

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Tietotekniikan osasto

Petri Pellinen

SIIRTOLINJATYYPPISEN LIIKKEENILMAISIMEN
LÄHEISYYDESSÄ LIIKKUVAN KOHTEEN HAVAITSEMINEN
JA OMINAISUUKSIEN TULKINTA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 11.3.1997

Työn valvoja

Erkki Oja

Työn ohjaaja

Ari Visa

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Petri Tapio Pellinen	
Työn nimi:	Siirtolinjatyyppisen liikkeenilmaisimen läheisyydessä liikkuvan kohteen havaitseminen ja ominaisuuksien tulkinta	
Päivämäärä:	11.3.1997	Sivumäärä: 64
Osasto:	- Tietotekniikan osasto	
Professuuri:	Tik-61 Tietojenkäsittelytekniikka (informaatiotekniikka)	
Työn valvoja:	Prof. Erkki Oja	
Työn ohjaaja:	Apul. prof. Ari Visa	
<p>Rajavartiolaitos tarvitsee käyttöönsä halvan ja luotettavan liikkeenilmaisimen maarajojen teknilliseen valvontaan. Tässä työssä tutkittiin mahdollisuuksia kehittää yhteistyöprojektina kehitetyn liikkeenilmaisimen prototyyppiä edelleen virrehälytysten vähentämiseksi. Lisäksi työssä tutkittiin voidaanko liikkeenilmaisimen lähimaastossa liikkuvan kohteen ominaisuuksista päätellä jotain ulostulosignaalin perusteella.</p> <p>Liikkeenilmaisimen toimintaan vaikuttavat ilmiöt identifioitiin. Tehtiin alustava koesarja, jolla selvitettiin liikkeenilmaisimen antennien keskinäisen etäisyyden vaikutusta liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin. Jatkokokeissa keskityttiin selvittämään kohteen koon ja sen sijainnin vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan. Eri kokoisia kohteita mallitettiin muoviastialla, joka täytettiin eri määrillä suolaliuosta.</p> <p>Saatujen tulosten perusteella esiteltiin uusi ilmaisumenetelmä käytettäväksi liikkeenilmaisimessa. Menetelmä perustuu FFT-muunnoksen tekemiseen liikkeenilmaisimen vastaanottimesta saatavalle tehotasosignaaliin. Tarkasteltaessa FFT-kertoimien amplitudeja ja vaiheita voidaan havaita kohteen liike liikkeenilmaisimen lähimaastossa. Lisäksi voidaan lineaarisen regression keinoin karkeasti arvioida kohteen nopeus ja korkeus, jolla se liikkuu.</p> <p>Työssä saatujen tulosten perusteella liikkeenilmaisimen jatkokehitys näyttää rajavartiolaitoksen kannalta kiinnostavalta.</p>		
Avainsanat:	liikkeenilmaisimien, hahmontunnistus, kokeiden suunnittelu, lineaarinen regressio, sähkömagneettinen tarkkailu	

Author:	Petri Tapio Pellinen	
Title:	Detection and Properties of a Target Moving Near a Transmission Line Type Motion Detector	
Date:	11.3.1997	Pages: 64
Department:	Computer science and Engineering	
Professorship:	Tik-61 Computer and Information Science	
Supervisor:	Prof. Erkki Oja	
Instructor:	Ass. prof. Ari Visa	
<p>The Border Guard of Finland needs an affordable and reliable motion detector for use in technical surveillance of land borders. Possibilities to further improve a jointly developed motion detector were investigated to reduce the number of false alarms given by the motion detector. Possibilities of deducing properties of a biological body moving near the motion detector from its output signal were also investigated.</p> <p>Phenomena affecting the output signal of the motion detector were identified. A preliminary series of experiments were made to define the effect of antenna distance on the output signal of the motion detector. Further experiments were made to define the effect of the size and location of a biological body on the output of the motion detector. Biological bodies were modeled using a plastic container filled with varying amounts of saline solution.</p> <p>On the basis of test results a new method of detecting biological bodies was introduced. The method is based on Fourier transform of the output signal from the motion detector. By studying the amplitudes and phases of the FFT coefficients the motion of a biological body in the vicinity of the motion detector can be observed. Using linear regression, speed and travelling height of a biological body can be roughly estimated.</p> <p>Further development of the motion detector seems interesting in light of results obtained in this thesis.</p>		
Keywords:	motion detector, pattern recognition, design and analysis of experiments, linear regression, electromagnetic surveillance	

Alkulause

Suurkiitokset osoitan tämän työn ohjaajalle apulaisprofessori Ari Visalle. Hän osallistui koko työn ajan aktiivisesti ratkaisuvaihtoehtojen ja etenemistapojen valintaan ja antoi korvaamattoman arvokkaita käytännön neuvoja. Hänen kokemuksensa ja asiantuntevan ohjauksensa ansiosta rajavartiolaitoksen kannalta tärkeää kehitysprojektia saatiin vietyä eteenpäin hallitusti ja tuloksekkaasti.

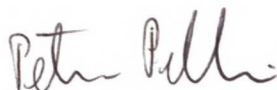
Esimiehiäni eversti Olavi Kaikkosta, everstiluutnantti Jorma Kosusta, komentaja Simo Pitkästä ja atk-päällikkö Jaakko Seppälää kiitän heidän innostavasta, kannustavasta ja pitkäjännitteisestä asennoitumisestaan työhöni sekä mahdollisuudesta tehdä tämä työ rajavartiolaitokselle.

Kiitokset työtovereilleni rajavartiolaitoksessa, joilta sain hyviä neuvoja, tukea ja apua työn käytännön järjestelyihin. Työtovereideni ansiosta tätä työtä oli mahdollista tehdä hyvässä ilmapiirissä ja yhteistyöhengessä. Erityisesti kiitän Tenho Jokelaista, Riitta Ahdetta ja Jani Niemistä, jotka työtovereinani rajavartiolaitoksen esikunnan atk-yksikössä jatkuvasti tukivat ja kannustivat minua työn edetessä.

Palautetta, neuvoja ja apua ovat antaneet etenkin Timo Peräkylä, Matti Kymäläinen, Tapio Pohjalainen, Tuomo Kivikari, Jorma Nolvi, Veli-Pekka Rajajärvi, Harri Ahonen, Mikko Heino, Risto Tolppanen ja Pentti Inkeri

Vaimoani Saria kiitän hyvistä hermoista, loistavasta huollosta, ymmärtämisestä ja Karoliina-vauvasta.

Helsinki, 3.3.1997



Petri Pellinen

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO	9
1.1 TYÖN TAUSTA	9
1.2 TUTKIMUSONGELMA	10
1.3 TYÖN TAVOITTEET.....	10
1.4 TYÖN RAJAUKSET	11
1.5 TÄMÄN TYÖN SISÄLTÖ.....	11
2. LIIKKEEN HAVAITSEMINEN SÄHKÖMAGNEETTISIN MENETELMIN	12
2.1 TAMPEREEN TEKNILLISEN KORKEAKOULUN TEKEMÄ TUTKIMUS LIIKKEENILMAISINPROTGTYYPIÄ KEHITELTÄESSÄ	12
2.2 LIIKKEENILMAISIMEN TOIMINTAPERIAATE	13
2.3 KAPPALEET SÄHKÖMAGNEETTISESSA KENTÄSSÄ	14
2.4 YLEISTETYN ANTENNIPROBLEEMAN RATKAISUSSA KÄYTETTYJÄ MENETELMIÄ	16
2.5 LIIKKEENILMAISIMEN TOIMINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	18
2.5.1 Antenneihin liittyvät ilmiöt.....	18
2.5.2 Kohteen ominaisuuksiin liittyvät ilmiöt.....	20
2.5.3 Ympäristöolosuhteisiin liittyvät ilmiöt	22
2.6 ANTENNIEN VÄLISEN ETÄISYYDEN OPTIMOINTI	24
3. AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT	29
3.1 KOESUUNNITELMA KORKEUDEN JA KOON VAIKUTUKSEN ARVIOIMISEKSI	29
3.2 KOEJÄRJESTELY KOHTEN KOON JA KORKEUDEN VAIKUTUKSEN ARVIOIMISEKSI.....	32
3.3 LAITTEISTOT.....	34
3.4 LINEAARINEN REGRESSIOMALLI.....	34
3.5 TILASTOLLISET TESTIT	34
3.6 DISKREETTI FOURIER-MUUNNOS	36
3.7 NOPEA FOURIER-MUUNNOS (FFT)	36
3.8 WELCHIN MENETELMÄ TEHOSPEKTRIN ESTIMOIMISEKSI.....	36
4. TUTKIMUSTULOKSET	37
4.1 TULOKSET KOHTEN KOON JA LIIKEKORKEUDEN VAIKUTUSTA KARTOITTAVISTA KOKEISTA.....	37
4.2 REGRESSIOANALYYSI	37
4.3 TEHOSPEKTRIN TARKASTELU.....	38
4.4 FFT-ANALYYSI.....	38
4.5 LIIKKEENILMAISIMEN ILMAISUMENETELMÄN KEHITTÄMINEN	49
5. LUOTETTAVUUSANALYYSI	51
5.1 YMPÄRISTÖTEKIJÖIDEN VAIKUTUKSET	51
5.2 YKSINKERTAISTUKSET JA OLETTAMUKSET	52

	5
5.3 MITTAUSAINEISTON MÄÄRÄ	52
5.4 MITTAUSTARKKUUS	53
5.5 TUTKIMUKSEN ULKOPUOLELLE JÄTETTYJEN FAKTOREIDEN VAIKUTUKSET	53
6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	56
6.1 KOHTEEN KORKEUDEN ARVIOINTI	56
6.2 ILMAISUMENETELMÄN TUOMA LISÄARVO.....	57
6.3 ANTENNIEN ASENNUKSEN MERKITYS LIIKKEENILMAISIMEN TOIMINTAAN	57
6.4 TULOSTEN VERIFIOINTI	58
6.5 UUDEN PROTOTYYPIN RAKENTAMINEN	59
6.6 KOHTEEN NOPEUDEN ARVIOINTI.....	60
6.7 KOHTEEN KOON ARVIOINTI.....	60
6.8 NUMEERISEN MALLIN RAKENTAMINEN LIIKKEENILMAISIMEN TOIMINNASTA.....	61
6.9 EHDOTETUT JATKOTOIMENPITEET TÄRKEYSJÄRJESTYKSESSÄ.....	61
7. LÄHDELUETTELO	62

Kuvaluettelo

KUVA 1: RF-SÄTEILEVÄN SIIRTOLINJATYYPPISEN LIIKKEENILMAISIMEN OSAT YLHÄÄLTÄPÄIN NÄHTYNÄ	13
KUVA 2: YLEISTETTY ANTENNIPROBLEEMA. VIRTALÄHTEEN LÄHEISYYDESSÄ ON IDEAALISESTI JOHTAVIA KAPPALEITA SEKÄ ERISTEITÄ.	15
KUVA 3: SIIRTOLINJATYYPPISEN LIIKKEENILMAISIMEN TOIMINTAYMPÄRISTÖ	18
KUVA 4: KOEJÄRJESTELY LIIKKEENILMAISIMEN ANTENNIEN VÄLISEN ETÄISYYDEN VAIKUTUKSEN MÄÄRÄÄMISEKSI LIIKKEENILMAISIMEN HERKKYYTEEN. LIIKKEENILMAISIMEN ANTENNIEN VÄLISTÄ ETÄISYYTTÄ VARIOITIIN 100 CM JA 300 CM VÄLILLÄ 10 CM VÄLEIN. KOHDETTA MALLINETTIIN 70 L 0,5M SUOLALIUOSASTIALLA.	25
KUVA 5: LIIKKEENILMAISIMEN VASTAANOTTIMEN HAVAITSEMA VASTAANOTETUN TEHOTASON KOKONAISDIFFERENSSI ANTENNIEN VÄLISEN ETÄISYYDEN FUNKTIONA. KUVAN KÄYRÄ ON KESKIARVO KAHDESTA KOETOISTOSTA. KUVASTA VOIDAAN HAVAITA KOKONAISDIFFERENSSIN SUURI RIIPPUVUUS ANTENNIEN VÄLISESTÄ ETÄISYYDESTÄ. KOKONAISDIFFERENSSI ON JAKSOLLINEN 50 CM JAKSOLLA. SUURIN KOKONAISDIFFERENSSI ON NOIN NELJÄ KERTAA PIENIMMÄN KOKONAISDIFFERENSSIN SUURUINEN. KUVASSA D=ANTENNIEN VÄLINEN ETÄISYYS, F=KOKONAISDIFFERENSSI.....	26
KUVA 6: LIIKKEENILMAISIMEN VASTAANOTTIMEN HAVAITSEMAN TEHOTASON KOKONAISDIFFERENSSIIN SOVITETUN EPÄLINEAARISEN MALLIN REGRESSIOANALYYSIN TULOKSET. MALLIN SELITYSASTE ON TYYDYTTÄVÄ. ERITYISEN HYVÄ ESTIMAATTI SAADAAN N2-PARAMETRILLE, JOKA ESTIMOI KOKONAISDIFFERENSSIN JAKSOA.	27
KUVA 7: MITTAUSDATAAN SOVITETTU FUNKTIO $F(D)=3,4 \cdot \text{ABS}(\sin(0,062 \cdot D))+2,4$. D=LIIKKEENILMAISIMEN ANTENNIEN VÄLINEN ETÄISYYS, F=LIIKKEENILMAISIMEN VASTAANOTTIMEN HAVAITSEMA TEHOTASON KOKONAISDIFFERENSSI. MITTAUSTULOKSET ON ESITETTY PIENILLÄ KAARILLA JA MITTAUSDATAAN SOVITETTU FUNKTIO YHTENÄISELLÄ MURTOVIIVALLA. SOVITETUN FUNKTION ARVOT ON LASKETTU AINOASTAAN KOESUUNNITELMAN MUKAISILLA ANTENNIEN ETÄISYYKSILLÄ. KUVASTA HAVAITAAN MITTAUSDATAN SUURI HAJONTA MINIMIKOHTIEN VÄLILLÄ JA PIENI HAJONTA MINIMIKOHDISSA. NÄISTÄ SEIKOISTA JOHTUEN HAVAINTOIHIN SOVITETUN MALLIN SELITYSASTE ON VAIN TYYDYTTÄVÄ, MUTTA JAKSOLLISUUTTA MITTAAVAN PARAMETRIN ESTIMAATTI MERKITSEVÄ.....	28
KUVA 8: KOEJÄRJESTELY LIIKKEENILMAISIMEN LÄHEISYYDESSÄ LIIKKUVAN KOHTEN KOON JA LIIKEKORKEUDEN VAIKUTUKSEN MÄÄRITTÄMISEKSI.....	33
KUVA 9: LIIKKEENILMAISIMEN VASTAANOTTIMEN HAVAITSEMA TEHOTASO PAIKAN FUNKTIONA. VASTAANOTTIMESTA SAATAVA SIGNAALI SUODATETAAN 6. ASTEEN BUTTERWORTH-ALIPÄÄSTÖSUODATTIMELLA, JONKA RAJATAAJUUS ON 30 Hz. HAVAITUSTA DATASTA POIMITAAN LIUKUVALLA IKKUNALLA 512 NÄYTTEEN MITTAINEN OSA FFT:N LASKEMISTA VARTEN. SIGNAALISTA POISTETAAN TASAJÄNNITEKOMPONENTTI.	39
KUVA 10: FFT:N MUODOSTAMINEN SUODATETUSTA LIIKKEENILMAISIMEN RSSI-SIGNAALISTA. 512 NÄYTTEEN MITTAISESTA OTOKSESTA LASKETAAN FFT JA SAATUJEN KERTOIMIEN 256 ENSIMMÄISTÄ ITSEISARVOA JA VAIHEKULMAA ESITETÄÄN ERILLISISSÄ DIAGRAMMEISSA.	40
KUVA 11: FFT-KERROINKARTTOJEN MUODOSTAMINEN LIUKUVALLA IKKUNALLA LASKETUISTA FFT:STA. KOHTEN LIIKKUESSA LIIKKEENILMAISIMEN YLI SAADAAN KARTTA FFT-KERTOIMIEN ITSEISARVOJEN	

JA VAIHEKULMIEN MUUTOKSESTA PAIKAN FUNKTIONA. KERTOIMIEN ARVOT ON ESITETTY VÄRISKAALOILLA, JOTKA ON ESITETTY KUVASSA.....	41
KUVA 12: FFT-KERTOIMIEN VAIHEKULMIEN NOLLASTA POIKKEAVIEN JUOKSUJEN KESKIMÄÄRÄISEN PITUUDEN MUUTTUMINEN KORKEUDEN FUNKTIONA. ALEMPANA ESITETYSSÄ MATALALLA KORKEUDELLA TEHDYSSÄ MITTAUKSESSA ANTENNIEN LÄHIMAASTOSSA ON YKSI LAAJA ALUE, JOSSA VAIHEKULMAT POIKKEAVAT NOLLASTA. KORKEAMMALLA TEHDYSÄ MITTAUKSESSA ON USEITA LÄHES SAMANPITUISIA NOLLASTA POIKKEAVIA VAIHEKULMAJUOKSUJA.	43
KUVA 13: LINEAARINEN REGRESSIO KOHTEN LIIKEKORKEUDEN MAANPINNASTA VAIKUTUKSESTA FFT-KERTOIMIEN NOLLASTA POIKKEAVIEN VAIHEKULMIEN KESKIMÄÄRÄISIIN JUOKSUJEN PITUUKSIIN 50 HZ:N KAISTALLA. H=KOODATTU KORKEUS, R=KESKIMÄÄRÄINEN NOLLASTA POIKKEAVIEN VAIHEKULMIEN JUOKSUN PITUUS. MITATTUUN DATAAN VOIDAAN SOVITTAA LINEAARINEN MALLI SELITYSASTEELLA 0,517.	45
KUVA 14: FFT-KERTOIMIEN NOLLASTA POIKKEAVIEN VAIHEKULMIEN JUOKSUJEN PITUUS 50 HZ:N KAISTALLA KORKEUDEN FUNKTIONA. MITATTUUN DATAAN ON SOVITETTU REGRESSIOSUORA. KUVASSA NÄKY Y LISÄKSI REGRESSIOSUORAN 90% LUOTTAMUSVÄLI. R=JUOKSUN PITUUS, H=KORKEUS	46
KUVA 15: LACK-OF-FIT -TESTIN TULOKSET KOHTEN LIIKEKORKEUDEN JA FFT-KERTOIMIEN VAIHEKULMIEN NOLLASTA POIKKEAVIEN JUOKSUJEN KESKIMÄÄRÄISEN PITUUDEN VÄLILLE SAADUN REGRESSIOMALLIN RIITTÄVYYDEN TUTKIMISEKSI. TESTITULOKSEN PERUSTEELLA LINEAARINEN REGRESSIOMALLI ON RIITTÄVÄ ILMIÖN MALLINTAMISEEN.....	47
KUVA 16: TODENNÄKÖISYYSDIAGRAMMI REGRESSIOANALYYSIN RESIDUAALIEN JAKAUMASTA. RESIDUAALIT OVAT LIKIMAIN SUORASSA LINJASSA. SUURIN OSA RESIDUAALEISTA ON LÄHELLÄ KESKIPISTETTÄ. RESIDUAALIT OVAT LIKIMAIN NORMAALIJAKAUTUNEITA.....	47
KUVA 17: REGRESSIOMALLIN RESIDUAALIT KOKEIDEN SUORITUSJÄRJESTYKSESSÄ. RESIDUAALEISSA EI OLE HAVAITTAVISSA AIKASIDONNAISTA TRENDIÄ. REGRESSIOANALYYSIN ANTAMIA TULOKSIA EI VOI KYSEENALAISTAA RESIDUAALIEN AJAN SUHTEEN KÄYTTÄYTYMISEN PERUSTEELLA.	48
KUVA 18: REGRESSIOANALYYSIN RESIDUAALIT MALLIN ENNUSTAMIEN ARVOJEN FUNKTIONA. KUVASTA HAVAITAAN, ETTÄ RESIDUAALIT KÄYTTÄYTYVÄT LIKIMAIN SAMALLA LAILLA REGRESSIOMALLIN KATTAMALLA ALUEELLA LUKUUNOTTAMATTA ALHAISIA ENNUSTEEN ARVOJA, JOTKA VASTAAVAT KOHTEN LIIKETTÄ KORKEALLA. RESIDUAALIEN KÄYTTÄYTYMINEN EI ANNA AIHETTA EPÄILLÄ REGRESSIOANALYYSISTÄ SAATUJA TULOKSIA.	49

Taulukkoluetelo

TAULUKKO 1: KOESUUNNITELMA ANTENNIEN VÄLISEN ETÄISYYDEN VAIKUTUKSEN ARVIOIMISEKSI

LIIKKEENILMAISIMEN VASTAANOTTAMAAN TEHOTASOON. KOETOISTOT SUORITETTIIN PERÄKKÄIN.

ANTENNIEN VÄLISTÄ ETÄISYYTTÄ VARIOITIIN SATUNNAISESSA JÄRJESTYKSESSÄ..... 24

TAULUKKO 2: KOESUUNNITELMA LIIKKEENILMAISIMEN LÄHEISYYDESSÄ LIIKKUVAN KOHTEN TILAVUUDEN

JA MAANPINNASTA MITATUN LIIKEKORKEUDEN VAIKUTUKSEN ARVIOIMISEKSI LIIKKEENILMAISIMEN

VASTAANOTTAMAAN TEHOTASOON. R=KOETOISTO, V=TILAVUUS, H=KORKEUS, L=LINJAN NUMERO 31

TAULUKKO 3: FFT-KERTOIMIEN VAIHEKULMAKARTOISTA MITATTUJEN SELLAISTEN JAKSOJEN PITUUS,

JOILLA VAIHEKULMA $\neq 0$. KORKEUSKOODIT: 1=10 CM, 2=54 CM, 3=98 CM, 4=152 CM. KORKEUDEN

KASVAESSA NOLLASTA POIKKEAVIEN VAIHEKULMAJAKSOJEN KESKIMÄÄRÄINEN PITUUS PIENENEE. . 44

1. Johdanto

1.1 Työn tausta

Rajavartiolaitos tarvitsee käyttöönsä halvan ja luotettavan liikkeenilmaisimen maarajojen teknilliseen valvontaan. AES-Systems Oy, Tampereen teknillinen korkeakoulu ja rajavartiolaitos käynnistivät yhdessä anturiprojektin. Projektin tuloksena saadun liikkeenilmaisimen jatkokehitysmahdollisuuksia halutaan selvittää.

Rajavartiolaitos on kokeillut erilaisia liikkeenilmaisimia. Tarkoituksena on löytää maarajojen teknilliseen vartiointiin soveltuva liikkeenilmaisin.

Rajavartiolaitoksen toiminnan kannalta liikkeenilmaisimelle on määritelty useita vaatimuksia. Halvoilla liikkeenilmaisimilla voidaan kattaa rajaosuus, joiden tiivis miesvartiointi olisi kallista. Liikkeenilmaisimen tulee toimia Suomen sääolosuhteissa. Useat ulkomaalaiset ilmaisimet ovat olleet ominaisuuksiltaan lupaavia mutta toimineet Suomen olosuhteissa kuitenkin epäluotettavasti. Ilmaisimen tulisi luotettavasti havaita lähiympäristössä liikkuvat ihmiset ja ajoneuvot. Virrehälytysten määrä tulisi minimoida, koska hälytysten tarkistamiseksi tehtävät matkat ovat yleensä pitkiä. Ilmaisimen huoltotarpeen tulee olla vähäinen. Ilmaisimet jätetään pitkiksi ajoiksi valvottaviin kohteisiin. Laitteita ei ole tarkoituksenmukaista käydä huoltamassa useasti. Huoltotarpeen vähyyteen liittyy myös alhainen virrankulutus. Ilmaisimien akkujen vaihto on aikaa vievä operaatio, kun rajaosuudella on käytössä kymmeniä ilmaisimia. Ilmaisimen asennuksen ja käyttöönoton tulisi olla yksinkertaista. Ilmaisimien asentajia ja käyttäjiä on rajavartiolaitoksessa satoja. Henkilöstön kouluttaminen ilmaisimen käyttöön tulisi olla mahdollisimman yksinkertaista ja nopeaa.

Markkinoilla tällä hetkellä olevat liikkeenilmaisimet eivät sovellu sellaisenaan rajavartiolaitoksen käyttöön, koska ne eivät täytä useimpia mainituista vaatimuksista.

Vuonna 1994 Tampereen teknillinen korkeakoulu, AES-Systems Oy, nykyinen Aspo Systems Oy ja rajavartiolaitos aloittivat yhdessä anturiprojektin. Projektin tarkoituksena oli kehittää prototyyppi liikkeenilmaisimesta, joka olisi kotimainen,

edullinen ja rajavartiolaitoksen käyttöön soveltuva. Projektissa kehitettiin rajavartiolaitoksen tarpeiden kannalta lupaava liikkeenilmaisimen prototyyppi.

1.2 Tutkimusongelma

Yhteistyöprojektissa kehitetyn liikkeenilmaisimen prototyypin nykyinen ilmaisutekniikka ei ole riittävän robusti operatiiviseen käyttöön. Virrehälytyksien karsimiseksi on toivottavaa, että liikkeenilmaisim pystyy antamaan hälytystiedon lisäksi lisäinformaatiota kohteen ominaisuuksista.

Tampereen teknillisen korkeakoulun kehittämä liikkeenilmaisimen prototyyppi havaitsee rajavartiolaitoksen tarpeiden kannalta riittävän varmasti liikkuvan kohteen. Liikkeenilmaisim antaa ainoastaan hälytystiedon kohteen liikkua liikkeenilmaisimeen kytkettyjen antennien lähimaastossa. Liikkeenilmaisim ei anna tietoa havaitun kohteen ominaisuuksista. Rajavartiolaitoksen operatiivisen toiminnan kannalta olisi toivottavaa saada karsittua eläinten aiheuttamat virrehälytykset pois. Liikkeenilmaisimen ilmaisuperiaatetta on kehitettävä siten, että kohteen ominaisuuksista saadaan tietoa. Tavoitetilassa liikkeenilmaisim voisi luokitella kohteet ajoneuvoiksi tai eloperäisiksi kohteiksi. Eloperäiset kohteet pitäisi pystyä luokittelemaan koon mukaan kolmeen luokkaan: keskivertoihmistä selvästi pienemmät kohteet, suunnilleen ihmisen kokoiset kohteet sekä keskivertoihmistä selvästi suuremmat kohteet. Tällä luokittelulla saadaan karsituksi suuri osa pieneläinten sekä hirvien ja karhujen aiheuttamista virrehälytyksistä.

1.3 Työn tavoitteet

Tässä työssä ensisijaisena tavoitteena on selvittää voidaanko liikkeenilmaisimen hälytystekniikkaa kehittää siten, että hälytysten määrä vastaa havaittujen kohteiden määrää ja ympäristötekijöiden muutosten aiheuttamat virrehälytykset karsiutuvat pois. Toissijaisena tavoitteena on selvittää alustavasti voidaanko liikkeenilmaisimen lähistöllä liikkuvasta kohteesta saada tietoa.

Rajavartiolaitoksen ilmaisimprojektin tavoitteena on saada aikaiseksi liikkeenilmaisim, jolla pystytään luotettavasti havaitsemaan liikkeenilmaisimen läheisyydessä liikkuva kohde. Kohde täytyy pystyä luokittelemaan pieneksi

eläimeksi, ihmisen kokoiseksi tai suureksi eläimeksi. Lisäksi halutaan pystyä erottelemaan ajoneuvot eläimistä ja ihmisistä. Tämän työn yhteydessä selvitetään tärkeimmät olemassa olevan prototyyppiliikkeenilmaisimen toimintaan vaikuttavat ilmiöt. Liikkeenilmaisimen ulostulosignaalin riippuvuutta siihen vaikuttavista tekijöistä selvitetään, jotta voidaan arvioida kannattaako liikkeenilmaisimen kehittelyä jatkaa.

1.4 Työn rajaukset

Työssä tarkastellaan kohteen koon ja sijainnin vaikutusta liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin ympäristöolosuhteiden pysyessä vakioina. Kohteen liikenopeuden vaikutusta liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin tutkitaan, mutta ei varioida koesuunnitelmassa koelaitteiston asettamien rajoitusten takia. Valitut tekijät ovat olennaisimpia ilmaisumenetelmän kehittämisen ja kohteen tunnistuksen kannalta. Mikäli valittujen faktoreiden vaikutuksen tarkastelun perusteella näyttää, että liikkeenilmaisimen kehitystä kannattaa jatkaa, voidaan jatkossa tarvittaessa tutkia muiden lähinnä ympäristötekijöihin liittyvien faktoreiden vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan.

Tampereen teknillinen korkeakoulu on omien tutkimustensa pohjalta valinnut useista liikkeenilmaisinvaihtoehtoista mielestään rajavartioloaitoksen tarpeisiin parhaiten soveltuvan. Liikkeenilmaisinprototyyppiä valmistettaessa on joitakin liikkeenilmaisimen toimintaan vaikuttavia faktoreita jo lyöty lukkoon. Näiden faktorien vaikutuksia liikkeenilmaisimen toimintaan ei jatkossa kannata tutkia ellei osoittaudu, että valitun arkkitehtuurin muuttaminen on ainoa tapa edetä liikkeenilmaisimen kehittämisessä. Esimerkiksi antennityypin vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan ei tutkita, koska Tampereen teknillinen korkeakoulu valitsi tekemiensä kokeilujen perusteella lattakaapelin sopivimmaksi antennityypiksi liikkeenilmaisimelle.

1.5 Tämän työn sisältö

Tämä työ on jaettu kuuteen lukuun. Ensimmäisessä luvussa esiteltiin työn taustat ja annettiin lyhyt kuvaus tutkittavasta ongelmasta. Toisessa luvussa esitellään tutkimuksen kohteena oleva laite ja ongelman teoreettinen tausta. Aiheesta tähän mennessä tehty tutkimus esitellään. Kolmannessa luvussa

esitellään tutkimuksen koesuunnitelma, koejärjestelyt ja käytetyt laitteistot ja menetelmät. Tutkimuksen tulokset on esitelty neljännessä luvussa. Viidennessä luvussa arvioidaan tutkimukseen vaikuttaneita ympäristötekijöitä, työssä tehtyjä yksinkertaistuksia ja olettamuksia sekä pois rajattujen ilmiöiden mahdollisia vaikutuksia. Työn perusteella tehdyt johtopäätökset ja suositukset jatkotoimenpiteiksi on esitelty kuudennessa luvussa.

2. Liikkeen havaitseminen sähkömagneettisin menetelmin

Tässä luvussa työn kohteena olevan liikkeenilmaisimen prototyypin kehittämisvaiheet esitellään lyhyesti. Liikkeenilmaisimen toiminta perustuu lähettimeen, vastaanottimeen sekä kahteen antennina toimivaan lattakaapeliin. Sähkömagneettisten kenttien teoriaa esitellään. Yleisimpiä menetelmiä liikkeenilmaisimen tyyppisten sähkömagneettisten ongelmien ratkaisemiseksi esitellään lyhyesti. Liikkeenilmaisimen lähimaastossa liikkuva kohde vaikuttaa monin tavoin liikkeenilmaisimen vastaanottimen vastaanottamaan tehotasoon. Merkittävimmät vastaanottimen havaitsemaan tehotasoon vaikuttavat faktorit esitellään. Liikkeenilmaisimen antennien väliseksi optimoimiseksi tehty koesarja ja siitä saadut tulokset esitellään.

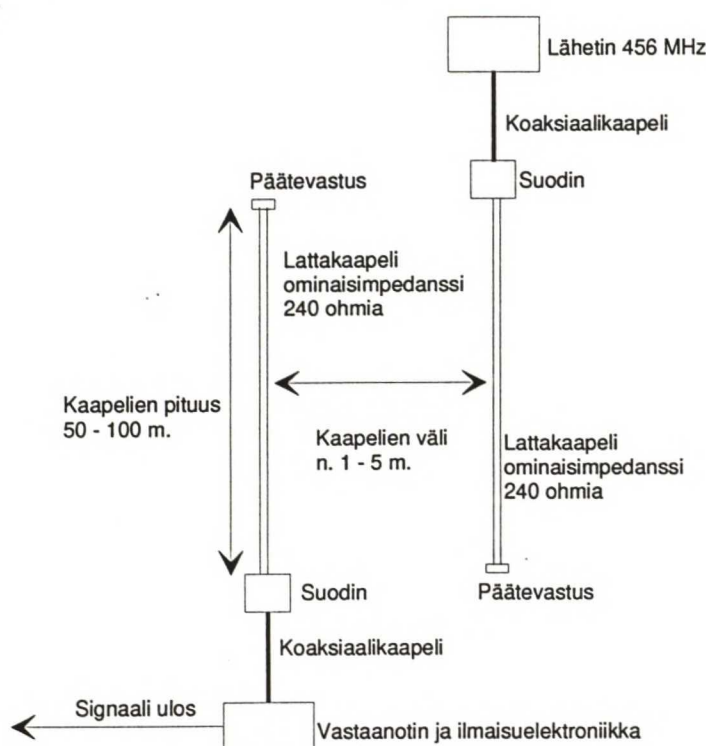
2.1 Tampereen teknillisen korkeakoulun tekemä tutkimus liikkeenilmaisiprotyypistä kehiteltäessä

Tampereen teknillinen korkeakoulu tutki useiden erityyppisten liikkeenilmaisimien soveltuvuutta rajavartiolaitoksen käyttöön. Tarkoituksena oli, että liikkeenilmaisimien voitaisiin valmistaa Suomessa. Tutkimuksessa keskityttiin lähinnä tärinäilmaisimiin sekä avolinja- ja siirtolinja-tyyppisiin antureihin. Tärinäilmaisimien huonoja puolia ovat kalleus ja asentamisen vaikeus. Avolinja- ja siirtolinja-antureita kokeiltiin heijastustyyppisinä ja kytkentätyyppisinä. Heijastustyyppisessä anturissa mitataan yhden kaapelin sovitusta kohteen liikkuessa kaapelin lähimaastossa. Kytkentätyyppisessä anturissa mitataan kaapelista toiseen siirtynyttä tehoa. Kaapelityypeinä kokeiltiin vuotavaa koaksiaalikaapelia sekä lattakaapelia. Kaapelityypeillä ei toiminnallisesti ole suurta eroa. Vuotava koaksiaalikaapeli on kalliimpaa ja vaikeampaa valmistaa kuin lattakaapeli. Lattakaapeli säteilee ympäristöönsä hieman enemmän kuin vuotava koaksiaalikaapeli. Anturityyppejä kokeiltiin alustavasti erityyppisissä

maastoissa. Tekemiensä tutkimusten perusteella Tampereen teknillinen korkeakoulu suositti jatkokehityskohteeksi kytkentätyypistä lattakaapeliliikkeenilmaisinta. Tällaisesta liikkeenilmaisimesta rakennettiin prototyyppi, joka luovutettiin AES-Systems Oy:lle ja rajavartiolaitokselle jatkokehittelyä varten.

2.2 Liikkeenilmaisimen toimintaperiaate

Jatkokehityksen kohteena olevassa liikkeenilmaisinprototyypissä on kuvan 1 mukaiset osat.



Kuva 1: RF-säteilevän siirtolinjatyyppisen liikkeenilmaisimen osat ylhäältäpäin nähtynä

Lattakaapeliantennit asennetaan maanpintaan muutaman metrin etäisyydelle toisistaan. Lähetin syöttää tehoa lattakaapeliin, joka säteilee heikosti ympäristöönsä. Vastaanotin on kytketty toiseen lattakaapeliin. Lähetin ja vastaanotin on asennettu liikkeenilmaisimen vastakkaisiin päihin. Tällä ratkaisulla saadaan lattakaapelissa tapahtuvia tehohäviöitä kompensoitua. Ilmaisimen toimintaherkkyys säilyy näin hyvänä kaapeliin koko pituudella. Kaapelit toimivat heikosti säteilevinä antenneine. Lattakaapelit valittiin antenniksi, koska antennien on oltava pitkät. Tehon syöttäminen esimerkiksi

pitkään dipoliantenniin on monimutkaista. Siirtojohdon käyttö antennina mahdollistaa pitkien antennien käytön. Ilmaisimessa mitataan vastaanotettua tehotasoa. Kaapelien läheisyydessä liikkuva kohde muuttaa kaapelien välistä kytkentää ja samalla vastaanotettua tehoa.

Liikkeenilmaisimen ilmaisumenetelmä perustuu tasomuutokseen.

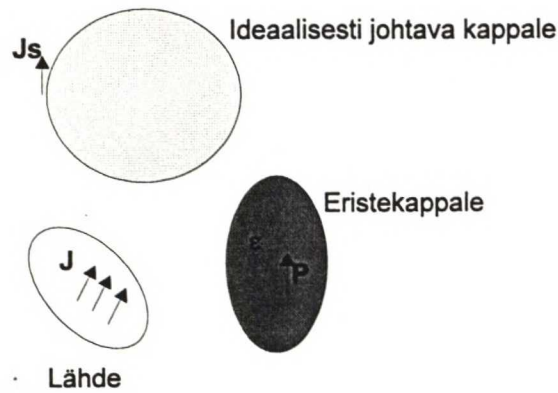
Vastaanotetun tehon muuttuessa riittävän nopeasti tarpeeksi paljon ilmaisimien hälyttää. Integrointiaika ja hälytyksen aiheuttava tasomuutos ovat prototyyppi-ilmaisimessa säädettävissä potentiometrien avulla. Ilmaisumenetelmän hyvänä puolena on sen helppo toteutus. Huonona puolena on muun muassa ilmaisumenetelmän herkkyys ulkoisten olosuhteiden vaihtelulle, jotka voivat aiheuttaa virrehälytyksiä. Kohteen liikuessa liikkeenilmaisimen läheisyydessä saadaan nykyisellä ilmaisumenetelmällä kymmeniä hälytyssignaaleja liikkeenilmaisimesta.

2.3 Kappaleet sähkömagneettisessa kentässä

Tässä kappaleessa käytetyt symbolit on esitetty allaolevassa luettelossa.

E	sähkökenttä
H	magneetikenttä
\bar{I}	yksikködyadi
j	imaginääriyksikkö
J	lähdevektori
J_p	polarisaatiovirta
J_s	pintavirta
k	aaltoluku
r	laskentapisteen paikkavektori
r'	lähdepisteen paikkavektori
V	tilavuus
ϵ	permittiivisyys
ϵ_0	tyhjiön permittiivisyys
μ	permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
ω	kulmataajuus
∇	dyadinen operaattori

Ilmaisimen toiminnan teoreettinen pohja perustuu kuvan 2 mukaiseen tilanteeseen.



Kuva 2: Yleistetty antenniprobleema. Virtalähteen läheisyydessä on ideaalisesti johtavia kappaleita sekä eristeitä.

Vapaassa avaruudessa on lähde J . Lähteen läheisyydessä on eristekappaleita sekä ideaalisesti johtavia kappaleita. Ideaalisesti johtavien kappaleiden johdepinnoilla olevien kenttien on toteutettava määrätyt reunaehdot. Kappaleiden pintavirrat J_s voidaan ratkaista numeerisilla menetelmillä. Kun pintavirrat ovat tiedossa voidaan ideaalisesti johtavia kappaleita käsitellä lähteinä. Eristekappaleet voidaan korvata polarisaatiovirralla J_p .

$$\mathbf{J}_p = j\omega(\epsilon - \epsilon_0)\mathbf{E} \quad (1)$$

Polarisaatiovirrat voidaan ratkaista numeerisilla menetelmillä. Kun johtavat kappaleet ja eristeet on korvattu ekvivalenteilla lähteillä, voidaan sähkö- ja magneettikentät ratkaista yhtälöistä (2) ja (3). Yhtälöissä esiintyvät integraalit voidaan ratkaista numeerisilla menetelmillä.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -j\omega\mu \int_V \overline{\overline{G}}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV' \quad (2)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \int_V [\nabla \times \overline{\overline{G}}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')] \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV' \quad (3)$$

jossa Greenin dyadi

$$\overline{\overline{G}}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = (\overline{\overline{I}} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla) G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (4)$$

ja Greenin funktio

$$G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \frac{e^{-jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \quad (5)$$

[Lindell et. al. 1995]

Ilmaisimen toiminta perustuu reaktiivisella lähikenttäalueella tapahtuviin ilmiöihin. Tällä alueella Greenin dyadia ei voida aproksimoida vaan laskemiseen täytyy käyttää tarkkoja lausekkeita. Geometrisesti yksinkertaiset ongelmat voidaan ratkaista kaavoista johtamalla. Lähes kaikki analyyttisesti ratkaistavissa olevat ongelmat on jo ratkaistu [Sadiku 1992]. Pinta- ja polarisaatiovirtojen ratkaisemiseen tarvittavat numeeriset menetelmät soveltuvat vain aallonpituuksissa mitattuina pieniin antenneihin. Liikkeenilmaisimen antennit ovat kymmenien aallonpituuksien mittaisia. Numeeristen menetelmien käyttö ei siis tässä tapauksessa ole mahdollista. Lisäksi antennin suuruuden takia yhtälöiden (2) ja (3) numeerinen ratkaiseminen on laskennallisesti erittäin raskas operaatio. Edellä mainituista syistä liikkeenilmaisimen toiminnan simuloinnista analyyttisen mallin avulla luovuttiin.

2.4 Yleistetyn antenniprobleeman ratkaisussa käytettyjä menetelmiä

Yleistetyn antenniprobleeman ratkaisussa käytetään usein Finite Difference Method (FDM)-tyyppisiä menetelmiä. FDM-menetelmän kehitti Thom [1961]. Menetelmää käytettiin alunperin epälineaaristen hydrodynaamisten yhtälöiden ratkaisemiseen. FDTD eli Finite Difference Time Domain -menetelmä on FDM-menetelmän pohjalta kehitetty menetelmä, joka perustuu laskettavan tilan jakamiseen sopivan kokoisiin elementteihin. Myös aika diskretoidaan sopivasti. Jokaisella aika-askeleella lasketaan kaikissa laskenta-alueen elementeissä Maxwellin yhtälöiden differenssiversiot. Aika-askeleen ollessa riittävän pieni nämä ovat hyvin lähellä Maxwellin yhtälöiden todellisia ratkaisuja. Maxwellin yhtälöiden differentiaaliversiot voidaan laskea elementtikohtaisesti siten, että viereisistä elementeistä lasketaan tarvittavat differentiaalit. FDTD laskentaan käytetään yleensä Yee [1966] kehittämäänsä algoritmiin perustuvia ratkaisuja. FDTD:tä käytetään kenttäongelmien ratkaisussa. Menetelmä vaatii kuitenkin paljon laskenta-aikaa. Niinpä sitä käytetäänkin lähinnä pienten tilavuuksien kenttäprobleemojen ratkaisemiseen [Sadiku 1992, Moore et al. 1984].

Momenttimenetelmää on myös käytetty sähkömagneettisten ongelmien ratkaisemiseen. Menetelmä perustuu kappaleiden mallintamiseen johtoverkkojen avulla. Sähkökentille voidaan kirjoittaa integraaliyhtälösystemi. Integraaliyhtälösystemi ratkaistaan lopuksi momenttimenetelmän avulla. Kappaleita mallintavien verkkojen johtoelementtien on oltava pieniä aallonpituuteen nähden. Suuria probleemia käsiteltäessä johtoelementtien määrä kasvaa huomattavasti. Momenttimenetelmää on käytetty muutaman aallonpituuden kokoisille alueille rajoittuneiden pulmien ratkaisemiseen. Tsuboi ja Tanaka [1989] käyttivät menetelmää lanka-antennin säteilykuvion mallintamiseen dielektrisen kappaleen läheisyydessä. Livesay ja Chen [1974] laskivat biologiseen kappaleeseen indusoituvan sähkökentän momenttimenetelmän avulla. Menetelmä soveltuu parhaiten kappaleiden tutkapoikkipinta-alan ja antennien impedanssien arviointiin [Moore et al. 1984].

Singularity Expansion Method on teoria, jolla kappaleiden sähkömagneettisia ominaisuuksia mallinnetaan singulariteettien avulla kompleksisessa taajuusavaruudessa [Baum 1976].

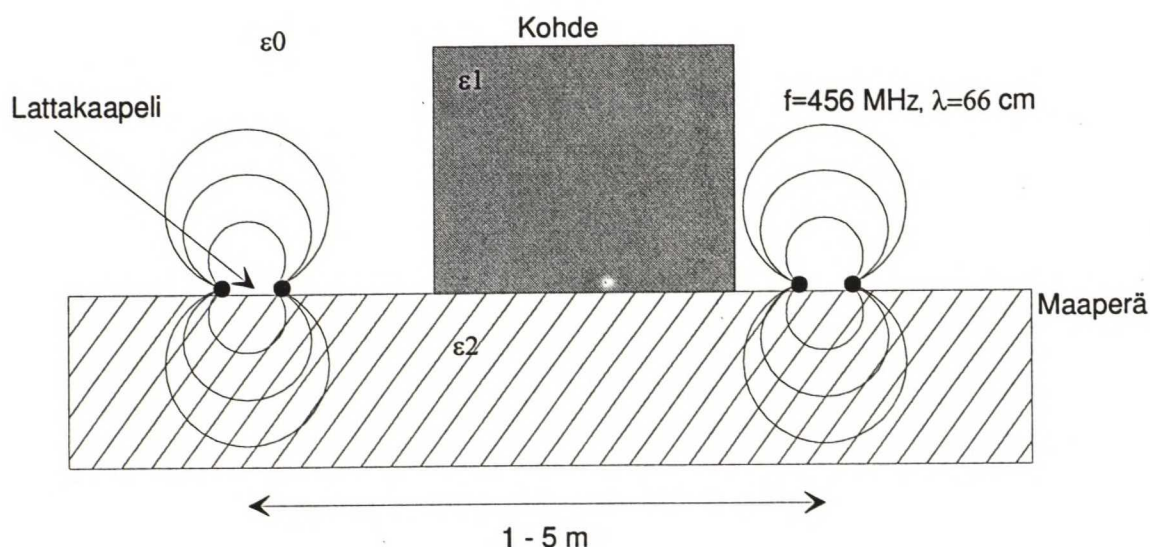
Transmission line matrix -menetelmä perustuu Maxwellin yhtälöissä esiintyvien sähkö- ja magneettikenttien samaistamiseen jatkuvien kaksijohtoisista siirtojohdoista muodostetun verkon virtoihin ja jännitteisiin. Tällaisella verkolla voidaan diskretoida väliaineen sähkömagneettiset ominaisuudet. Yleistetty antenniprobleema voidaan menetelmän avulla ratkaista muodostamalla ekvivalentti siirtolinja matriisi ja ratkaisemalla saadut yhtälöryhmät numeerisesti [Moore et al. 1984].

Finite element method (FEM) perustuu tarkastelualueen jakamiseen elementteihin. Jokaiselle elementille määritellään siinä vaikuttavat yhtälöt. Seuraavaksi tarkastelualueen elementit kootaan yhteen ja ratkaistaan saatu yhtälöryhmä. FEM on tehokas menetelmä mallinnettaessa monimutkaista geometriaa ja epähomogeenisia aineita. Menetelmän matemaattinen pohja perustuu Courantin [1943] esitykseen. Menetelmällä voidaan ratkaista muitakin kuin elektromagneettisia ongelmia.

2.5 Liikkeenilmaisimen toimintaan vaikuttavat tekijät

Tässä luvussa käsitellään ilmaisimen toimintaympäristöä ja ilmaisimen toimintaan vaikuttavia fysikaalisia ilmiöitä. Ilmiöiden vaikutusmekanismi ilmaisimen toimintaan esitellään.

Kuvassa 3 on esitetty liikkeenilmaisimen toimintaympäristö. Lattakaapelit säteilevät ympäristöön sähkömagneettista energiaa. Kaapeleiden välillä on reaktiivista ja kapasitiivista kytkentää. Kaapeleiden lähistöllä oleva kohde vaimentaa ja heijastaa sähkömagneettista säteilyä. Lisäksi kaapelin lähellä oleva kohde vaikuttaa kaapelin impedanssiin. Liikkeenilmaisimen toimintaan vaikuttavat monet ilmaisimen ja ympäristön tekijät, joita esitellään seuraavassa.



Kuva 3: Siirtolinjatyyppisen liikkeenilmaisimen toimintaympäristö

2.5.1 Antenneihin liittyvät ilmiöt

Antennien tyyppi vaikuttaa antennin säteilemään sähkömagneettiseen kenttään. Lähettimeen ja vastaanottimeen on kytketty lattakaapelit, jotka säteilevät heikosti ympäristöönsä. Valitsemalla antenniksi heikosti säteilevä kaapeli, on sähkömagneettinen säteily saatu rajattua pienelle alueelle ilmaisimen lähimaastoon. Lattakaapeli säteilee 456 MHz:n taajuudella lähiympäristöön häiritsemättä kuitenkaan kauempana olevia vastaanottimia. 456 MHz:n taajuus valittiin Tampereen teknillisen korkeakoulun kokeilujen perusteella. Kokeissa havaittiin, että 456 MHz:n taajuinen sähkömagneettinen säteily kytkeytyy voimakkaimmin ihmiseen. Antennin fyysistä pituutta on

mahdollista kasvattaa suureksi käyttämällä antennina siirtolinjaa. Lattakaapelin suurimpana etuna on sen halpuus.

Ilmaisimen antennit voidaan asettaa maanpinnalle joko yhdensuuntaisesti tai kulmaan toisiinsa nähden. Antennien heikon kentän takia on kuitenkin perusteltua olettaa, että kasvatettaessa antennien välistä kulmaa paljon, heikentyy ilmaisuvarmuus ilmaisimen siinä päässä, jossa antennilankojen etäisyys toisistaan on suurin.

Ilmaisimen käyttötarkoituksen kannalta olisi edullisinta asentaa ilmaisinelangot yhdensuuntaisesti. Tällöin ne voidaan asentaa joko kulku-uran molemmin puolin tai poikittain arvioidun ylitysalueen yli. Ilmaisinelankojen asentaminen yhdensuuntaisesti on helpompaa kuin lankojen asentaminen tiettyyn kulmaan toisiinsa nähden. Maasto-olosuhteissa ei ilmaisinelankoja saada asennettua haluttuun kulmaan, vaan langat joudutaan asentamaan suoraan linjaan vierekkäin.

Prototyypiliikkeenilmaisimen antennina toimivien lattakaapelien mutkittelu vaikuttaa antennien säteilemään sähkömagneettiseen kenttään. Lattakaapelien ollessa suorina voidaan niiden säteilemän kentän olevan symmetrian perusteella kohtalaisen homogeeninen lähes antennien kattamalla osuudella. Antennien päiden lähistöllä kenttä ei enää ole homogeeninen. Mikäli lattakaapelit asennetaan siten että ne mutkittelevat, ei antennien säteilemä kenttä enää ole homogeeninen. Mutkittelevien antennien säteilevän kentän laskeminen on huomattavan monimutkaista.

Ilmaisimiprototyypillä tehdyissä kenttäkokeissa havaittiin, että ilmaisimen antennien keskinäinen etäisyys vaikutti voimakkaasti ilmaisuherkkyyteen. Antennien välinen kapasitiivinen ja reaktiivinen kytkentä muuttuu etäisyyden funktiona. Antennien välisen etäisyyden vaikutusta ilmaisimen toimintaan on tutkittava. Liikkeenilmaisimen käytön kannalta on olennaista tietää kuinka tarkasti liikkeenilmaisimen antennit on asennettava maastoon, jotta voidaan taata liikkeenilmaisimen herkkä ja virheetön toiminta.

Hill [1988] on tutkinut sähkömagneettista kenttää lähellä maata olevan antennin ympäristössä. Hill havaitsi, että sähkömagneettinen kenttä maaperässä riippuu

antennin korkeudesta. Näin ollen ilmaisinelkkojen etäisyys maanpinnasta vaikuttaa antennien väliseen kytkentään. Ilmaisinelkkojen etäisyys maanpinnasta voi vaihdella käytännön asennuksissa jonkin verran. Esimerkiksi maaperän kasvillisuus vaikuttaa ilmaisinelkan korkeuteen maanpinnasta. Asennuskorkeus on kuitenkin tarvittaessa mahdollista vakioida, mutta asennuskorkeuden vakioiminen saattaa vaikeuttaa liikkeenilmaisimen asennusta maastoon huomattavastikin riippuen korkeudesta jolle antennilangat tulisi asentaa. Antennien naamioiminen on myös vaikeaa, mikäli ne joudutaan asentamaan irti maanpinnasta. Mikäli antennilangat asennetaan irti maanpinnasta, ne tarttuvat helposti kohteisiin.

Kierrettäessä parikaapelia pituusakselinsa ympäri syntyy niin sanottu kierretty parikaapeli. Kierretty parikaapeli ei säteile juuri lainkaan ympäristöönsä. Siinä kulkevaan signaaliin ei myöskään vaikuta ympäristön sähkömagneettinen säteily. Tällainen kaapelityyppi on siis ilmaisimen käyttötarkoitusta ajatellen epätoivottava. Liikkeenilmaisimen herkkyydellä tälle parametrille on hyvin paljon vaikutusta asennuksen helppouteen. Mikäli kiertymistä joudutaan erityisesti varomaan saattaa antennien asentaminen muuttua työlääksi.

2.5.2 Kohteen ominaisuuksiin liittyvät ilmiöt

Biologinen kappale antennin läheisyydessä vaikuttaa antennin impedanssiin [Nyquist et al. 1977]. Kappaleella on vaikutusta myös antennin suuntakuviin. Osa antennin säteilemästä tehosta absorboituu biologiseen kappaleeseen [Karimullah et al. 1980].

Ihmisiä ja eläimiä on mallitettu sähkömagneettisia ilmiöitä tutkittaessa joko suolavesiliuksella tai fantomilla (phantom body) [Karimullah et al. 1980]. Ajoneuvoa voitaneen mallintaa metallilaatikolla. Sähkömagneettinen säteily ei tunkeudu syvälle metallin sisään, joten pelkkä ajoneuvon kuoren mallintaminen kokeita varten riittää.

Kohteen koon kasvaessa myös kohteen kokonaispinta-ala kasvaa. Heijastumisen vaikutus liikkeenilmaisimen signaaliin riippuu myös kohteen pinta-alasta.

Higashi ja Ishihara [1990] ovat tutkineet muun muassa hikoilun vaikutusta sähkömagneettisen säteilyn tunkeutumisvyvyyteen ja suhteelliseen permittiivisyyteen kehon eri osissa. Tutkimuksen mukaan hikoilulla ei juurikaan ole vaikutusta suhteelliseen permittiivisyyteen 450 MHz:n taajuusalueella.

Kudokset absorboivat sähkömagneettista säteilyä [Shellswell et al. 1988]. Kohteen kudosten kokonaismäärän pitäisi vaikuttaa sähkömagneettiseen kenttään. Painon vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan tutkitaan sopivilla suolaliuosastioilla. Kohteen paino ja pinta-ala ovat ihmisillä ja eläimillä läheisessä suhteessa toisiinsa. Suunnilleen saman painoiset eläimet saattavat olla hyvinkin eri muotoisia. Esimerkiksi karhu ja hirvi voivat molemmat painaa noin 150 kg, mutta hirvi on aivan toisen muotoinen kuin karhu. Muodon vaikutusta liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin on vaikea selvittää kokeellisesti.

Kohteen maadoitus vaikuttaa antennin ja biologisen kappaleen väliseen kytkentään [Karimullah et al. 1980]. Kytkenän muuttuessa liikkeenilmaisimen ulostulosignaalin muuttuu. Esimerkiksi paljain jaloin tai kumisaappaat jalassa liikkuva ihminen saattavat vaikuttaa liikkeenilmaisimen signaaliin hyvinkin eri tavalla. Maadoituksen yhteisvaikutus maaperän sähkönjohtavuuden kanssa saattaisi olla merkittävä.

Kohteen vaatteiden materiaali vaikuttanee ilmaisimen signaalin käyttäytymiseen. Jotkin materiaalit johtavat sähkömagneettista säteilyä hyvin. Jotkin materiaalit taas ovat lähinnä heikkoja eristeitä, joilla ei juurikaan ole vaikutusta sähkömagneettiseen säteilyyn. Vaatteiden kosteus vaikuttaa myös niiden sähkönjohtokykyyn. Côté et al. [1991] ovat tutkineet puuvillan dielektristen ominaisuuksien riippuvuutta kankaan kosteudesta. Tutkimuksessa havaittiin, että kankaan kosteuden ja sen dielektrisen vakion välillä on lineaarinen riippuvuus vakiolämpötilassa. Riippuvuus vaihteli kuitenkin huomattavasti eri tekijöiden vaikutuksesta. Tutkimuksen mukaan kankaan tiheys, lämpötila sekä märkään kankaaseen liuenneet suolat vaikuttivat merkittävästi dielektrisiin ominaisuuksiin. Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan olettaa, että havaittavan kohteen vaatetuksella ja vaatetuksen kosteudella on vaikutusta liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin. Hiestä vaatteisiin liuenneet suolat vaikuttavat myös liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin. Eläinten turkki

voidaan sähkömagneettisten kenttien kannalta rinnastaa vaatteeseen. Eläimen turkin sähkömagneettiset ominaisuudet muuttuvat kosteuden funktiona.

Biologinen kohde vaikuttaa antennin impedanssiin eniten, kun se on lähellä antennia [Karimullah et al. 1980]. Tämän perusteella suurimmat kohteen vaikutukset liikkeenilmaisimen signaaliin ilmenevät kohteen ollessa lähellä jompaa kumpaa liikkeenilmaisimen antenneista. Karimullahin mukaan biologisella kappaleella on suurin vaikutus antennin impedanssiin etäisyyden antennista ollessa alle puolet aallonpituudesta. Liikkeenilmaisimen radiolähettimen aallonpituus on noin 66 cm. Karimullahin tutkimuksen perusteella kohteiden vaikutus liikkeenilmaisimen signaaliin tulisi siis olla suurimmillaan alle 30 cm etäisyydellä liikkeenilmaisimen jommasta kummasta antennista. Tällöin todellisessa käyttötilanteessa liikkeenilmaisimen signaali olisi suuresti riippuvainen siitä astuuko eläin tai ihminen liikkeenilmaisimen antennin lähelle vai harppaako antennina toimivan lattakaapelin yli.

Päiden lähistöllä antennien säteilemä sähkömagneettinen kenttä on erilainen kuin antennilankojen keskikohdan läheisyydessä. Koska antennit ovat pitkiä aallonpituuteen verrattuna, voitaneen olettaa, että kenttä on kohtuullisen homogeeninen suurimmalla osalla antennien pituutta. Ainoastaan antennien päiden lähistöllä kenttä muuttuu huomattavasti. Lähettimestä tulevan signaalin vaimenemisella liikkeenilmaisimen antenneina toimivissa lattakaapeleissa saattaa olla vaikutusta ilmaisimen herkkyyteen. Tätä vaikutusta on prototyypissä pyritty pienentämään sijoittamalla lähetin ja vastaanotin ilmaisimen eri päihin. Tällöin lähetysignaalin vaimenemisen tulisi kompensoitua vastaanotinantennin herkistymisellä.

2.5.3 Ympäristöolosuhteisiin liittyvät ilmiöt

Filho ja Portela [1988] ovat tutkineet eri maalajien dielektrisiä ominaisuuksia. Tutkimuksessa havaittiin, että maan dielektriset ominaisuudet riippuvat huomattavasti maaperän tyypistä ja kosteudesta. Tutkimus tehtiin 40 Hz - 2 MHz:n taajuusalueella. Tutkimus ei kata 450 MHz:n aluetta, mutta on todennäköistä että tälläkin taajuusalueella kosteudella ja maalajilla on vaikutusta maaperän dielektrisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksen mukaan maaperä koostuu yleensä monenlaisista rakeista, joilla ei ole kemiallisia

sidoksia. Maaperän sähkömagneettiset ominaisuudet riippuvat läheisesti maaperässä olevan veden määrästä sekä maaperään liuenneiden suolojen määrästä. Kuiva hiekka toimii tutkitulla taajuusalueella lähinnä heikkona eristeenä. Arulanandan [1991] havaitsi, että dielektrinen vakio muuttui maaperän huokoisuuden funktiona. Thevanayagam [1993] on esittänyt metodin maaperän dielektristen ominaisuuksien mallintamiseen. Tutkimuksessa otetaan huomioon maaperän huokoisuus, siinä esiintyvien partikkeleiden koko ja maaperään liennut vesi.

Liikkeenilmaisinta tullaan käyttämään suomalaisessa metsämaastossa. Metsämaastossa esiintyy monenlaisia maalajeja. Kuiva hiekkamaa vaikuttanee vähiten ilmaisimen toimintaan. Toisena äärimmäisyytenä on soinen maasto, joka on hyvin kosteaa. Maalajien suolapitoisuus vaihtelee paljon. Suolapitoisuus vaikuttaa maalajin sähkönjohtavuuteen ja tätä kautta liikkeenilmaisimen toimintaan. Maaperän rakenne vaikuttaa sähkömagneettisten aaltojen etenemiseen ja liikkeenilmaisimen toimintaan.

Maaston geometria vaikuttaa liikkeenilmaisimen sähkömagneettiseen kenttään heijastusten ja vaimenemisten kautta. Maaperän geometrian vaikutusta ilmaisimen toimintaan on erittäin vaikea testata kokeellisesti. Laboratorio-olosuhteissa ei maastogeometriaa voi rakentaa täydessä koossa. Maastogeometrian mittaaminen maastossa on myös erittäin työlästä. Maastossa voi lisäksi olla vaikea löytää kohteita, joissa maaston geometria on juuri kokeisiin sopiva. Geometrialle on hankala kehittää matemaattista mittaria. Liikkeenilmaisimen kalibrointi maastossa ei onnistu, koska kohteen liike liikkeenilmaisimen yli voi aiheuttaa erityyppisen vasteen riippuen siitä minkälaisessa kohdassa kohde liikkuu. Esimerkiksi kohteen liikkeessä notkelman pohjaa pitkin tai kummun yli liikkeenilmaisimen havaitsema tehotasosignaali saattaa heijastuksista johtuen vaihdella paljonkin.

Kasvillisuus vaikuttaa sähkömagneettiseen säteilyyn sirottamalla ja vaimentamalla sitä.

Ilmankosteus vaikuttaa sähkömagneettiseen säteilyyn. Ilman kyky sitoa itseensä kosteutta riippuu lämpötilasta. Sähkömagneettiseen säteilyyn ilman lämpötilalla ei pitäisi juurikaan olla vaikutusta. Ilman lämpötilan vaikutus

saattaakin näkyä lähinnä liikkeenilmaisimen elektronisissa komponenteissa. Komponenttiarvojen muutokset lämpötilan muuttuessa vaikuttavat myös liikkeenilmaisimen signaaliin.

2.6 Antennien välisen etäisyyden optimointi

Työn aluksi tehtiin alustava koesarja, jonka avulla selvitettiin optimietäisyys liikkeenilmaisimen antennille. Optimaalisuuden kriteerinä pidetään kohteen liikkeen aiheuttamaa kokonaismuutosta signaalissa. Kokonaismuutos lasketaan differenssien avulla diskreetistä signaalista. Antennien välisen etäisyyden optimoimisella pyritään selvittämään onko liikkeenilmaisimen erityisen herkkä tai epäherkkä tietyissä olosuhteissa.

Antennien välistä etäisyyttä optimoitaessa suoritettiin taulukon 1 mukainen koesarja. Koesarjassa faktorina oli liikkeenilmaisimen antennien välinen etäisyys. Faktoria varioitiin välillä 1 m - 3 m 10 cm välein. Faktorin arvotasot käytiin läpi satunnaisessa järjestyksessä. Kokeet lohkotettiin siten, että kaikki ensimmäisen koesarjan mittaukset tehtiin ennen toisen koesarjan mittauksia.

Koetoisto	Antennien välinen etäisyys/cm																				
1	170	240	300	160	270	200	140	100	210	120	180	260	220	290	190	280	150	230	130	110	250
2	190	280	170	300	200	140	160	260	210	150	100	240	290	180	230	270	130	110	250	120	220

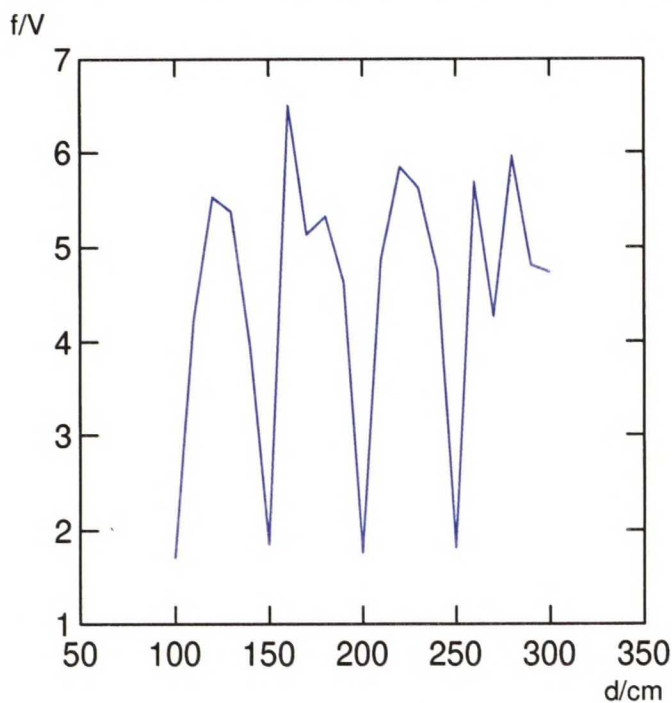
Taulukko 1: Koesuunnitelma antennien välisen etäisyyden vaikutuksen arvioimiseksi liikkeenilmaisimen vastaanottamaan tehotasoon. Koetoistot suoritettiin peräkkäin. Antennien välistä etäisyyttä varioitiin satunnaisessa järjestyksessä.

Aallonpituuden ollessa 66 cm saadaan tällöin näytteitä noin 1/6-aallonpituuden välein. Koesarja tehtiin kahteen kertaan. Mitattiin liikkeenilmaisimen vastaanottimen vastaanottamaa RF-tehotasoa.

Koejärjestely on esitetty kuvassa 4. Lähetintä ja lähetinantennia liikuteltiin koesuunnitelman mukaisesti vastaanottimen ja vastaanotinantennin pysyessä paikallaan. Kohteen dimensiot olivat 36 x 36 x 60 cm (leveys x syvyys x korkeus). Kohdeastiassa oli 0,5M suolaliuosta 70 l. Kohde liikkui 50 cm korkeudella maanpinnasta. Nämä arvot valittiin, koska ne ovat lähellä sellaisen kohteen ominaisuuksia, joita liikkeenilmaisimella halutaan havaita. Jokaisella faktorin arvolla kohdetta liikutettiin 958 cm liikkeenilmaisimen antennien

Kokeissa mitattiin liikkeenilmaisimen vastaanottimen havaitsemaa tehotasoa kohteen liikkuesssa liikkeenilmaisimen antennien yli. Jokaisessa mittauksessa saatiin tuloksena käyrä vastaanotetusta tehotasosta paikan funktiona. Mittausten perusteella laskettiin kokonaisdifferenssi vastaanotetusta tehotasosta kohteen liikkuesssa liikkeenilmaisimen antennien yli. Kahden koetoiston keskimääräinen kokonaisdifferenssi antennien välisen etäisyyden funktiona on esitetty kuvassa 5.

Liikkeenilmaisimen vastaanottimen havaitsema tehotason kokonaisdifferenssi antennien välisen etäisyyden funktiona



Kuva 5: Liikkeenilmaisimen vastaanottimen havaitsema vastaanotetun tehotason kokonaisdifferenssi antennien välisen etäisyyden funktiona. Kuvan käyrä on keskiarvo kahdesta koetoistosta. Kuvasta voidaan havaita kokonaisdifferenssin suuri riippuvuus antennien välisestä etäisyydestä. Kokonaisdifferenssi on jaksollinen 50 cm jaksolla. Suurin kokonaisdifferenssi on noin neljä kertaa pienimmän kokonaisdifferenssin suuruinen. Kuvassa d=antennien välinen etäisyys, f=kokonaisdifferenssi

Mittaustuloksista laskettuihin kokonaisdifferensseihin sovitettiin käyrä, jonka yleinen muoto oli:

$$f(d) = n_1 * |\sin(n_2 * d)| + n_3 \quad (13)$$

Sovitettava käyrä valittiin mittaustuloksia tarkastelemalla. Kaavassa (13) f =liikkeenilmaisimen vastaanottimen havaitsema tehotason kokonaisdifferenssi, d =liikkeenilmaisimen antennien välinen etäisyys, n_1 , n_2 ja n_3 ovat estimoitavia parametrejä. Tämän epälineaarisen regressioanalyysin tulokset on esitetty kuvassa 6. Mallin selitysaste on 0,928. Selitystasetta ei kuitenkaan epälineaarisisessa regressiossa pidetä hyvänä mallin kelpoisuuden mittarina. Eniten käytetään R (havaittu vs. ennustettu) -mittaria, joka tässä analyysissä on 0,446. Mittarin mukaan malli sopii havaintoihin keskinkertaisesti. Kuvan 6 alalaidassa on esitetty estimoidut n_1 -, n_2 - ja n_3 -parametrit sekä näiden 95% luottamusvälit. Merkillepantavaa on, että sinifunktion jaksoa estimoivan n_2 -parametrin luottamusväli on erittäin kapea. Liikkeenilmaisimen vastaanottimen havaitseman tehotason kokonaisdifferenssin jaksollisuuden voidaan siis hyvällä tarkkuudella sanoa olevan $\pi/n_2 = \pi/0,063 = 50$ cm.

Dependent variable is TDA

Source	Sum-of-Squares	DF	Mean-Square
Regression	905.476	3	301.825
Residual	70.386	39	1.805
Total	975.862	42	
Mean corrected	127.076	41	

Raw R-square (1-Residual/Total)	=	0.928
Mean corrected R-square (1-Residual/Corrected)	=	0.446
R(observed vs predicted) square	=	0.446

Parameter	Estimate	A.S.E.	Param/ASE	Wald Confidence Interval	
				Lower < 95%	Upper
N1	3.422	0.682	5.019	2.043	4.800
N2	0.063	0.000	139.182	0.062	0.064
N3	2.445	0.481	5.082	1.472	3.419

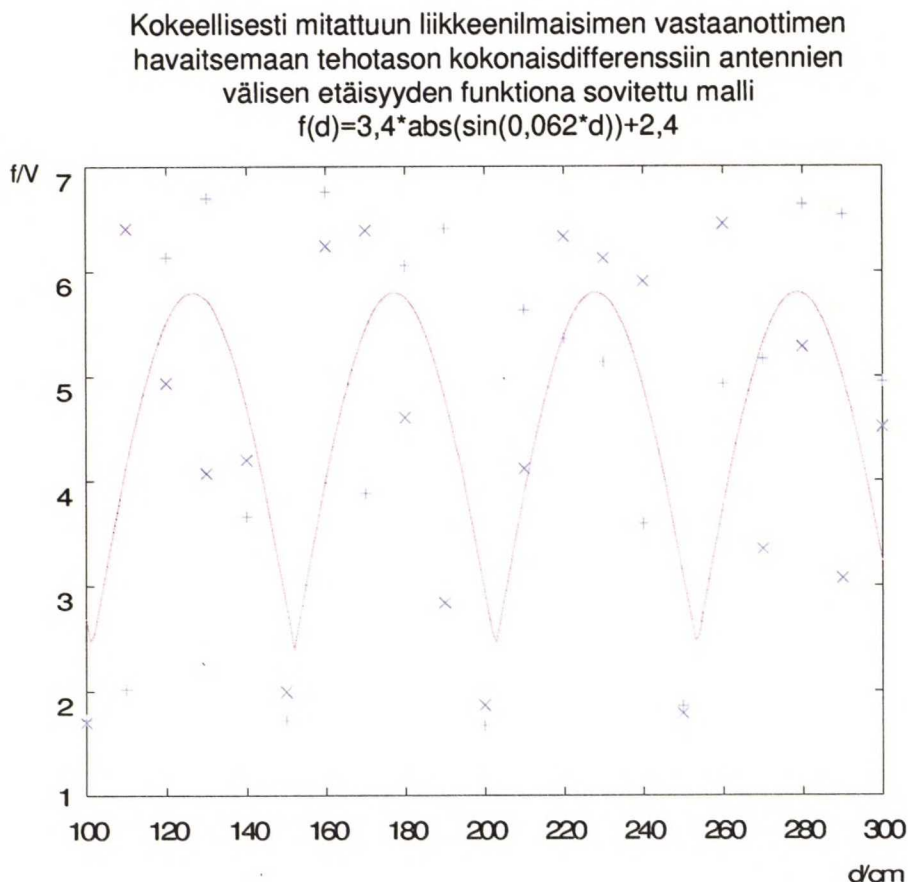
Kuva 6: Liikkeenilmaisimen vastaanottimen havaitseman tehotason kokonaisdifferenssiin sovitetun epälineaarisen mallin regressioanalyysin tulokset. Mallin selitysaste on tyydyttävä. Erityisen hyvä estimaatti saadaan N_2 -parametrille, joka estimoii kokonaisdifferenssin jaksoa.

Kuvassa 7 on esitetty mittaushavaintoihin sovitettu funktio

$$f(d) = 3,4 * |\sin(0,062 * d)| + 2,4 \quad (14)$$

jossa d =antennien välinen etäisyys senttimetreinä ja f =vastaanotetusta tehotasosta laskettu kokonaisdifferenssi. Kuvassa 7 mittaushavainnot on esitetty pienillä kaarimerkeillä ja sovitettu funktio jatkuvalla viivalla. Sovitetun funktion arvot on laskettu ainoastaan koesuunnitelman mukaisilla antennien välisillä etäisyyksillä, minkä vuoksi sovitetun funktion kuvaaja ei kuvassa 7 vastaa funktion todellista kuvaajaa. Kuvasta 7 nähdään kuinka mittaustulosten

perusteella laskettujen kokonaisdifferenssien suuri hajonta aiheuttaa mallin huonon selitysasteen. Toisaalta kuvasta 7 nähdään myös, että 50 cm välein toistuvien kokonaisdifferenssin minimikohtien kohdalla mittaustulosten hajonta on pieni. Analyysistä saadut tulokset ovat siis kuvan tarkastelun perusteella oikeita.



Kuva 7: Mittausdataan sovitettu funktio $f(d)=3,4*\text{abs}(\sin(0,062*d))+2,4$.

d =liikkeenilmaisimen antennien välinen etäisyys, f =liikkeenilmaisimen vastaanottimen havaitsema tehotason kokonaisdifferenssi. Mittaustulokset on esitetty pienillä kaarilla ja mittausedataa sovitettu funktio yhtenäisellä murtoviivalla. Sovitetun funktion arvot on laskettu ainoastaan koesuunnitelman mukaisilla antennien etäisyyksillä. Kuvasta havaitaan mittausedatan suuri hajonta minimikohtien välillä ja pieni hajonta minimikohtissa. Näistä seikoista johtuen havaintoihin sovitetun mallin selitysaste on vain tyydyttävä, mutta jaksollisuutta mittaavan parametrin estimaatti merkitsevä.

Liikkeenilmaisimen herkkyydestä kohteen tai ympäristön ominaisuuksien muuttuessa ei tämän koesarjan perusteella voi sanoa mitään. Koesarjan avulla

saatiin verifioitua, että ilmaisimen herkkyys vaihtelee antennien välisen etäisyyden funktiona.

Jatkotutkimuksissa käytettävää antennien välistä etäisyyttä valittaessa otettiin huomioon mittausten perusteella tehty malli sekä käytännön näkökohtana antennien asentaminen todellisessa käyttötilanteessa. Mallin perusteella haluttiin valita antennien välinen etäisyys siten, että liikkeenilmaisimen käyttäytyminen olisi stabiilia sekä herkkää lähimaastossa liikkuville kohteille. Antennien asentaminen todellisessa käyttötilanteessa tulisi olla mahdollisimman helppoa.

Jatkotutkimuksessa päätettiin käyttää antennien välisenä etäisyytenä 230 cm. Tällä etäisyydellä liikkeenilmaisimen herkkyys lähimaastossa tapahtuvalle liikkeelle on paikallisessa maksimissaan. 230 cm kohdalla oleva maksimi näyttää myös mittaustulosten perusteella olevan stabiilein maksimi alueella jolla antennien välistä etäisyyttä varioitiin. Antennit on asennettava siten, että antennien välinen etäisyys ei vaihtele viittä senttimetriä enempää. Kahdenkymmenenviiden senttimetrin muutos antennien välisessä etäisyydessä laskee tehotasosta regressiomallin avulla laskettua kokonaisdifferenssiä noin 60 % . Mittaustulosten perusteella tehon lasku voi olla jopa noin 80 %.

3. Aineisto ja tutkimusmenetelmät

Luvussa esitellään koesuunnitelma, jolla selvitetään liikkeenilmaisimen lähimaastossa liikkuvan kohteen sijainnin ja koon vaikutusta liikkeenilmaisimen vastaanottimesta saatavaan signaaliin. Koejärjestely ja kokeissa käytetyt laitteistot kuvataan. Kokeista saatavan datan jatkokäsittelyssä käytettävät menetelmät esitellään lyhyesti.

3.1 Koesuunnitelma korkeuden ja koon vaikutuksen arvioimiseksi

Koesarjassa varioitiin kahta faktoria: kohteen tilavuutta ja sen korkeutta maanpinnasta. Tarkoituksena oli tehdä mittausten perusteella regressioanalyysi faktorien vaikutuksesta liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin. Toistamalla koesarjoja voidaan regressiomallin soveltuvuutta ilmiön kuvaamiseen arvioida.

Regressioanalyysin kannalta arvotasojen määrä tulisi olla mahdollisimman suuri. Ideaalisesti korkeutta olisi pitänyt varioida noin kymmenen senttimetrin välein maanpinnasta aina noin kolmen metrin korkeudelle saakka. Kohteen tilavuutta olisi pitänyt varioida noin kymmenen litran välein kymmenestä litrasta aina noin kolmeen sataan litraan saakka. Kaikki faktoreiden arvotasot olisi pitänyt käydä läpi kuudella mittauslinjalla, jotka olisivat olleet kymmenen senttimetrin päässä toisistaan. Koetoistoja olisi mielellään pitänyt olla vähintään neljä, jotta varianssia olisi voitu estimoida hyvin. Tällä koejärjestelyllä mittauksia olisi ollut 2160 kappaletta. Mittaukset vievät paljon aikaa. Käytetyllä koejärjestelyllä tunnissa ehtii tehdä noin viisi mittausta. Ideaalisen koesuunnitelman vaatimat mittaukset olisivat vieneet noin 432 tuntia eli 54 työpäivää. Koesarjaan oli mahdollisuus käyttää kaksi päivää ja järjestelyihin yksi päivä koepaikkana käytetyn lentokonehallin käyttövaatimusten takia. Päättiin laatia koesuunnitelma siten, että kahdessa päivässä ehditään kerätä tietoa liikkeenilmaisimen toiminnasta kaikkein kiinnostavimmilla faktorien arvotasoilla.

Kumpaakin muuttujaa varioitiin neljällä eri arvotasolla. Koesarjat tehtiin kolmella eri mittauslinjalla antennin keskikohdan läheisyydessä. Koesarjat tehtiin kaksi kertaa. Koeasetelmia oli kuusitoista, mittauslinjoja kolme ja toistoja kaksi. Kaiken kaikkiaan mittauksia tehtiin siis 96 kappaletta. Kohteen kokoa varioitiin siten, että säiliö täytettiin ensimmäistä koetoistoa varten neljässä erässä. Jokaisella kohteen koolla varioitiin kohteen korkeutta satunnaisessa järjestyksessä. Myös mittauslinja valittiin satunnaisesti. Toista koetoistoa varten säiliö tyhjennettiin neljässä erässä. Jälleen korkeutta varioitiin satunnaisesti kohteen tilavuuden pienentyessä järjestelmällisesti. Koesuunnitelma on esitetty taulukossa 2.

v=tilavuus/l	koodi
10	0
80	1
150	2
220	3

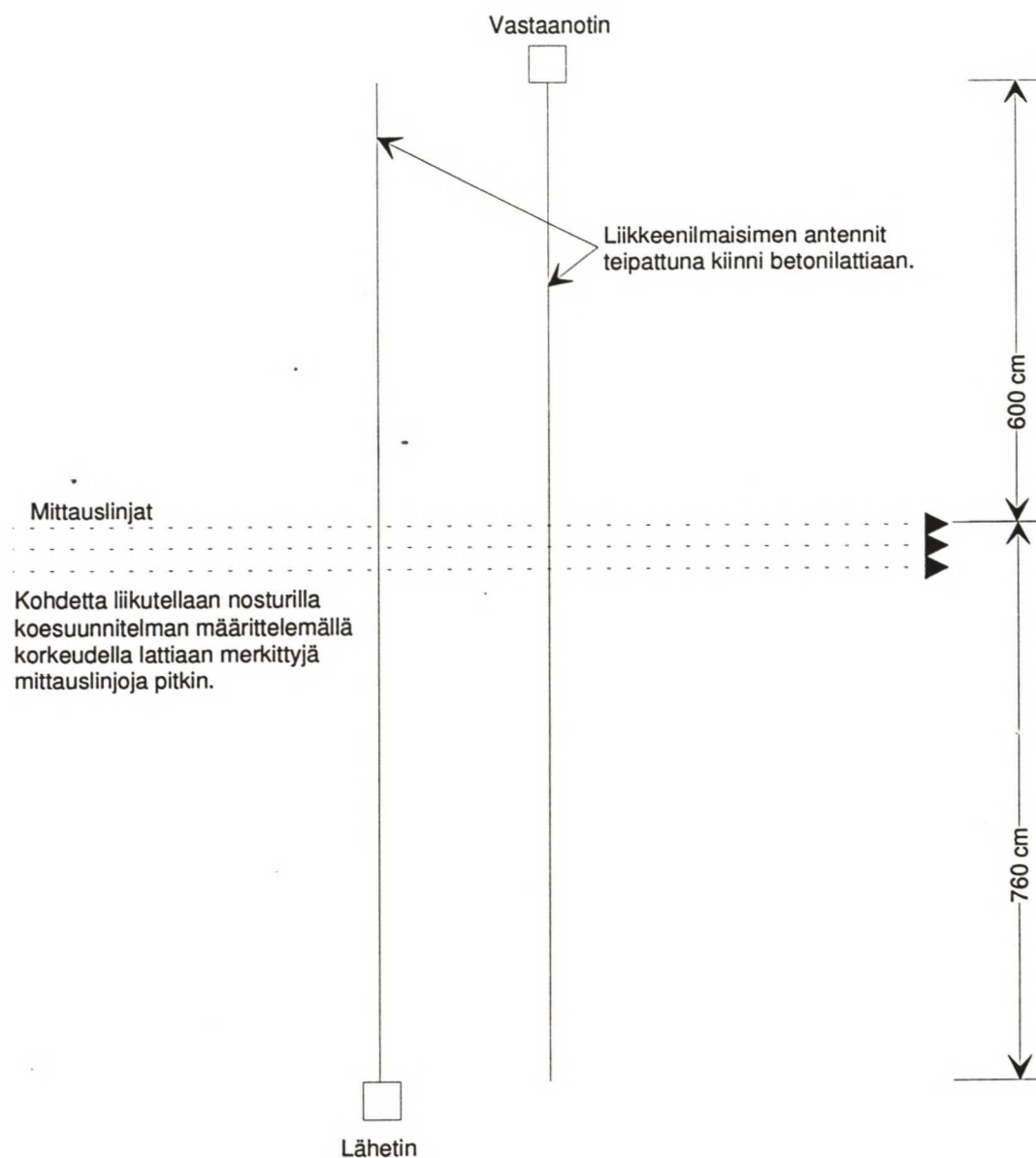
h=korkeus/cm	koodi
10	0
54	1
98	2
152	3

r	v	h	l	r	v	h	l	r	v	h	l	r	v	h	l
0	0	1	0	0	2	0	1	1	3	2	0	1	1	2	2
0	0	3	1	0	2	0	2	1	3	0	0	1	1	2	0
0	0	1	2	0	2	2	1	1	3	3	1	1	1	0	1
0	0	0	1	0	2	2	2	1	3	3	2	1	1	3	2
0	0	2	1	0	2	2	0	1	3	0	2	1	1	2	1
0	0	1	1	0	2	0	0	1	3	2	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	2	3	0	1	3	3	0	1	1	1	0
0	0	2	2	0	2	1	0	1	3	0	1	1	1	3	1
0	0	0	2	0	2	3	1	1	3	1	0	1	1	1	2
0	0	2	0	0	2	3	2	1	3	2	2	1	1	3	0
0	0	3	0	0	2	1	1	1	3	1	2	1	1	0	0
0	0	3	2	0	2	1	2	1	3	1	1	1	1	0	2
0	1	1	2	0	3	0	0	1	2	2	0	1	0	3	0
0	1	0	1	0	3	0	1	1	2	1	1	1	0	0	2
0	1	2	0	0	3	3	2	1	2	3	0	1	0	0	1
0	1	3	1	0	3	1	2	1	2	0	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	3	1	0	1	2	3	2	1	0	3	2
0	1	3	0	0	3	1	1	1	2	1	0	1	0	3	1
0	1	3	2	0	3	0	2	1	2	2	2	1	0	1	2
0	1	0	0	0	3	3	0	1	2	1	2	1	0	2	1
0	1	2	2	0	3	3	1	1	2	2	1	1	0	2	2
0	1	0	2	0	3	2	0	1	2	3	1	1	0	1	1
0	1	2	1	0	3	2	2	1	2	0	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	3	2	1	1	2	0	2	1	0	2	0

Taulukko 2: Koesuunnitelma liikkeenilmaisimen läheisyydessä liikkuvan kohteen tilavuuden ja maanpinnasta mitatun liikekorkeuden vaikutuksen arvioimiseksi liikkeenilmaisimen vastaanottamaan tehotasoon. r=koetoisto, v=tilavuus, h=korkeus, l=linjan numero

3.2 Koejärjestely kohteen koon ja korkeuden vaikutuksen arvioimiseksi

Koejärjestely oli kuvan 8 mukainen. Liikkeenilmaisimen antennit asetettiin 230 cm etäisyydelle toisistaan. Tämän etäisyyden havaittiin kappaleessa 2.6 esitetyn koesarjan perusteella maksimoivan kohteen aiheuttaman muutoksen liikkeenilmaisimen signaaliin ainakin tietyissä olosuhteissa. Antennit kiinnitettiin teipillä tiiviisti lattiaan, siten että niissä ei ollut kierrettä. Lattiaan merkittiin kolme mittauslinjaa, joita pitkin kohteita liikuteltiin kohtisuoraan liikkeenilmaisimen antennien yli. Mittauslinjat olivat 30 cm eli noin puolen liikkeenilmaisimen lähettimen aallonpituuden etäisyydellä toisistaan. Liikkeenilmaisimen ympäristössä liikkuvana kohteena käytettiin suolaliuoksella täytettävää muovista säiliötä. Samaa säiliötä käytettiin eri kokoisten kohteiden simulointiin. Säiliö täytettiin neljällä eri suolaliuosmäärällä. Kohteen simuloimismekaniikan takia kaikkien kohteiden pohjapinta-ala on sama, mutta sivujen pinta-ala vaihtelee liuosmäärän funktiona. Suolaliuossäiliötä kuljetettiin nosturilla koesuunnitelman mukaisella korkeudella liikkeenilmaisimen antennien yli merkittyjä mittauslinjoja pitkin. Kohde liikkui kolmekymmentä sekuntia 12,75 m pitkää mittauslinjaa pitkin. Nosturin alkukiihdytykseen kului neljä sekuntia. Näiden neljän ensimmäisen sekunnin aikana kohde liikkui 1,20 m. Loppumatkan kohde liikkui vakionopeudella 44,42 cm/s. Liikkeenilmaisimeen kytketyllä kannettavalla tietokoneella johon oli asennettu datankeruukortti mitattiin liikkeenilmaisimen vastaanottimesta saatavaa Received Signal Strength Indicator -signaalia, joka ilmaisee vastaanotetun tehotason. Näytteenottotaajuus oli 100 Hz. Jokaiselta mittauslinjalta saatiin 2600 näytettä, joita käytettiin jatkoanalyysissä. Peräkkäiset näytteet on otettu siis keskimäärin 0,44 cm etäisyydellä toisistaan.



Nosturin
alkukiih-
dytys
4s.

Kohde liikkuu loppumatkan 26 sekunnissa nopeudella 44,42 cm/s.

Kuva 8: Koejärjestely liikkeenilmaisimen läheisyydessä liikkuvan kohteen koon ja liikekorkeuden vaikutuksen määrittämiseksi.

3.3 Laitteistot

Liikkeenilmaisimeen oli asennettu 13,5 m pituiset antennit. Antennien pituus oli huomattavasti lyhyempi kuin todellisessa käyttötilanteessa. Pituutta lyhennettiin, jotta kokeet voitaisiin tehdä sisätiloissa mahdollisimman vakiona pysyvissä olosuhteissa.

Liikkeenilmaisimen läheisyydessä liikkuvana kohteena käytettiin muovista säiliötä. Säiliön dimensiot olivat 42 cm x 48 cm x 100 cm (leveys x syvyys x korkeus). Säiliö täytettiin koesuunnitelman mukaisesti eri määriä 0,5 M suolaliuosta, jota käytetään kudosten korvikkeena sähkökenttämittauksissa. Säiliötä liikuteltiin nosturilla liikkeenilmaisimen ympäristössä koesuunnitelman mukaisia reittejä pitkin.

Liikkeenilmaisimesta saatavan signaalin tallennukseen käytettiin kannettavaa tietokonetta. Tietokoneeseen oli asennettu datankeruukortti sekä datankeruuhjelmisto. Tietokoneella suoritettavat mittaukset varmennettiin oskilloskoopilla.

3.4 Lineaarinen regressiomalli

Regressioanalyysin tekemiseen käytettiin Systat-tilastomatematiikan ohjelmistoa. Lineaarisessa regressioanalyysissä mittaushavaintoihin pyritään sovittamaan malli:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + E_i \quad (6)$$

jossa Y_i on satunnaismuuttuja, joka riippuu havaituista arvoista x_i . β_0 kuvaa y-akselin leikkauskohtaa ja β_1 regressiosuoran kulmakerrointa. E on satunnaismuuttuja keskiarvolla 0. Parametrit β_0 ja β_1 estimoidaan yleensä pienimmän neliösumman menetelmällä.

3.5 Tilastolliset testit

Testisuureella

$$T_{n-2} = \frac{(B_1 - \beta_1^0)}{S / \sqrt{S_{xx}}} \quad (7)$$

voidaan testata onko lineaarisen regressiomallin estimaattori B_1 yhtäsuuri kuin mielivaltaisen luku β_1^0 . n =havaintojen lukumäärä, S =keskihajonnan estimaattori ja $S_{xx} = [n \sum x^2 - (\sum x)^2] / n$. Testisuure noudattaa t-jakaumaa vapausasteella $n-2$. Testiä käytetään erityisesti testattaessa ovatko lineaarisen regressiomallin estimoidut parametrit β_0 ja $\beta_1 = 0$. Mikäli $\beta_1 = 0$ ei lineaarinen malli ole tilastollisessa mielessä merkitsevä [Milton et al. 1986].

Regressiomallin soveltuvuutta havaintojen kuvaamiseen voidaan testata tilastollisesti lack-of-fit-testillä [Montgomery 1991]. Testiä varten ainakin yhdessä mittauspisteessä on oltava toistuvia havaintoja. Mikäli havaintoja on n kappaletta siten, että

$$\begin{aligned} y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n_1} &= \text{toistuvat havainnot } x_1\text{:ssä} \\ y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n_2} &= \text{toistuvat havainnot } x_2\text{:ssä} \\ &\dots \\ y_{m1}, y_{m2}, \dots, y_{mn_m} &= \text{toistuvat havainnot } x_m\text{:ssä} \end{aligned}$$

voidaan mallin soveltuvuutta havaintojen kuvaamiseen testata testisuureella

$$F_0 = \frac{SS_{LOF} / (m-2)}{SS_{PE} / (n-m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (8)$$

Testisuure noudattaa F-jakaumaa vapausasteilla $m-2$ ja $n-m$. Kaavassa (9) virheneliösumman oletetaan koostuvan kahdesta elementistä

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (9)$$

joista SS_{PE} kuvaa satunnaisvaihtelua havainnoissa ja SS_{LOF} mallista johtuvaa osaa virheneliösummasta. Kokonaisvirheneliösumma voidaan laskea havainnoista ja mallin ennustamista arvoista:

$$SS_E = \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (10)$$

Kaavassa (10) y_j ovat havaintoja ja \hat{y}_j mallin ennustamia arvoja. Havaintojen satunnaisvaihtelua kuvaava neliösumma voidaan laskea suoraan alkuperäisten havaintojen ja niiden keskiarvojen perusteella:

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{u=1}^{n_i} (y_{iu} - \bar{y}_i)^2 \quad (11)$$

Keskiarvot havainnoille lasketaan tasoittain jokaiselle x :n arvolle.

3.6 Diskreetti Fourier-muunnos

Jos $f(k)$ on diskreetin muuttujan k funktio, voidaan sen diskreetti Fourier-muunnos määritellä:

$$F(u) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-i \frac{2\pi}{N} uk} \quad | 0 \leq u \leq N-1 \quad (12)$$

Kaavassa (12) F =muunnettu funktio, N =muunnettavien näytteiden määrä ja f =muunnettava funktio. Muunnos on diskreetti versio tavallisesta Fourier-muunnoksesta. Tätä muunnosta käytetään aikariippuvien signaalien taajuustason analyysissä [Jackson 1989].

3.7 Nopea Fourier-muunnos (FFT)

Nopean tavan laskea diskreetti Fourier-muunnos tietokoneella kehittivät Cooley ja Tukey [1965]. FFT:tä käytetään signaalien taajuustasossa tapahtuvaan tarkasteluun ja konvoluution laskemiseen. Tässä työssä FFT:tä käytetään liikkeenilmaisimen vastaanottimen signaalin analysointiin kohteen liikkeessä liikkeenilmaisimen antennien yli. FFT:n laskemiseen on olemassa useita kaupallisesti saatavilla olevia laitteisto- ja ohjelmistoratkaisuja. Kaupallisilla ratkaisuilla voidaan tyypillisesti laskea FFT reaaliaikaisesti. Tässä työssä FFT laskettiin Matlab-ohjelmiston kirjastofunktiolla.

3.8 Welchin menetelmä tehosppektrin estimoimiseksi

Welch [1967] kehitti nopeaan Fourier-muunnokseen perustuvan menetelmän, jolla signaalin tehosppektri voidaan estimoida. Menetelmä perustuu signaalin jakamiseen useaan osaan. Osista lasketaan sitten erikseen nopeat Fourier-

muunnokset. Osista laskettuja muunnoksia keskiarvoistamalla saadaan tehospektrille estimaatti. Menetelmällä saadun estimaatin luottamusväli määräytyy sen perusteella kuinka moneen osaan alkuperäinen signaali on jaettu sekä osien pituuden perusteella. Menetelmä on käyttökelpoinen estimoitaessa signaalia, jonka taajuusominaisuudet pysyvät muuttumattomina tai muuttuvat hitaasti. Menetelmää käytetään signaalien taajuustason analyysissä.

4. Tutkimustulokset

Tässä luvussa esitellään kokeista saatujen mittaustulosten muoto. Signaalin jatkokäsittelymenetelmät kuvataan. Tulosten tulkinta regressioanalyysillä ja FFT-analyysillä esitellään. FFT-analyysin perusteella liikkeenilmaisimen lähimaastossa liikkuvan kohteen nopeus ja korkeus jolla se liikkuu voidaan arvioida karkeasti. Tulosten tarkastelun perusteella esitellään tämänhetkisessä prototyypissä olevan ilmaisumenetelmän korvaava uusi ilmaisumenetelmä, Uusi ilmaisumenetelmä perustuu FFT-kertoimien itseisarvon ja vaihekulman tarkasteluun.

4.1 Tulokset kohteen koon ja liikekorkeuden vaikutusta kartoittavista kokeista

Mittausten tuloksena saatiin liikkeenilmaisimen vastaanottama tehotaso ajan funktiona kohteen liikkua vakionopeudella liikkeenilmaisimeen kytkettyjen antennien yli. Tehotasokäyriä saatiin kolmelta eri mittauslinjalta neljällä eri kokoisella kohteella neljältä eri korkeudelta. Kohteen vakionopeudesta johtuen kohteen paikka tietyllä ajanhetkellä voidaan määrittää. Tuloksista nähdään siis liikkeenilmaisimen vastaanottama tehotaso paikan funktiona. Mitatut signaalit suodatettiin kuudennen asteen bessel-alipäästösuotimella, jonka rajataajuus oli 30 Hz.

4.2 Regressioanalyysi

Liikkeenilmaisimen vastaanottamalle tehotasolle yritettiin luoda yksinkertainen regressiomalli. Mallissa muuttujana olisi ollut kohteen koko. Dataan ei voinut sovittaa mallia, joka olisi ilmaissut vastaanotetun tehotason kohteen koon ja

paikan funktiona. Tämä tulos on teorian pohjalta odotettavissa. Muuttujien multiplikatiivisen vaikutuksen johdosta yksinkertainen lineaarinen regressiomalli ei riitä kuvaamaan tehotason vaihtelua. Muunlaisen mallin sovittaminen dataan vaatisi käytännössä ilmiön pohjana olevan sähkömagneettisen probleeman ratkaisemisen analyttisin menetelmin.

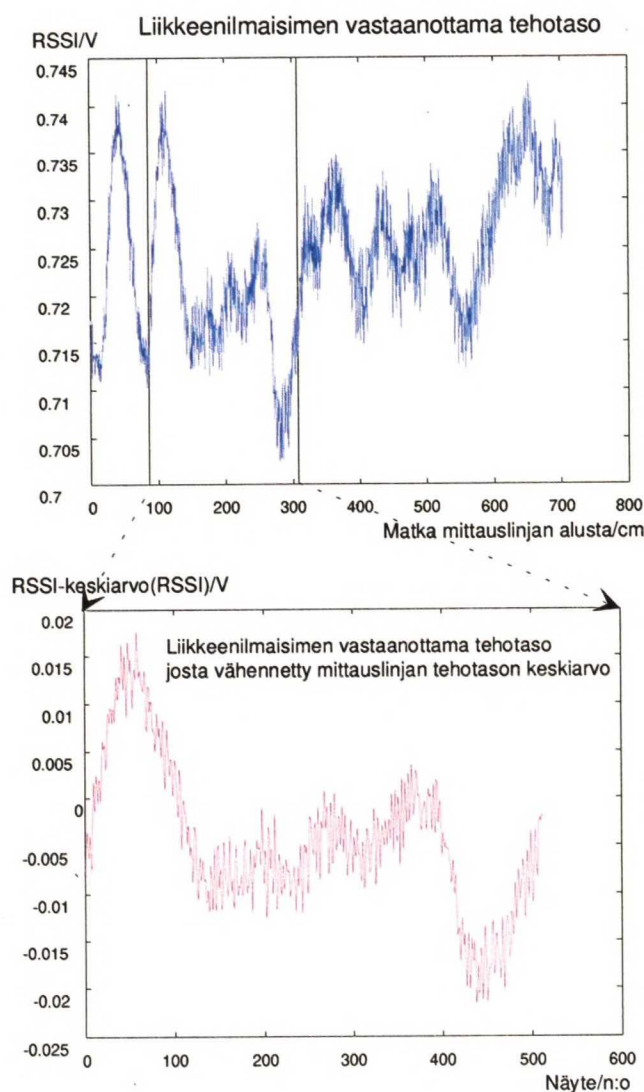
4.3 Tehospektrin tarkastelu

Welchin tehospektrin estimointimenetelmän käyttökelpoisuutta mittaustulosten tarkasteluun tutkittiin. Lähestymistavasta kuitenkin luovuttiin. Welchin keskiarvoistettujen periodogrammien menetelmällä estimoidun tehospektrin luottamusväli saadaan käytännön kannalta riittävän kapeaksi vain jos estimointiin käytetään riittävän pitkää näytettä analysoitavasta signaalista. Signaalin taajuusominaisuuksien tulisi olla lähes vakiot näytteenottovälillä, jotta tehospektriestimaatti antaisi oikean kuvan signaalin energijakaumasta. Tässä työssä käsitellyssä tilanteessa ei signaalista saada riittävän pitkää näytettä, jotta tehospektriestimaatin luottamusväli saataisiin käyttökelpoisen pieneksi. Signaalin energijakauma taajuustasossa ei tässä työssä tutkitussa tilanteessa todennäköisesti pysy vakiona, vaan muuttuneen kohtuullisen nopeastikin kohteen siirtyessä antennien ulkopuoliselta alueelta antennien päälle ja antennien väliin jäävälle alueelle. Jotta tehospektristä saataisiin tämän työn kannalta hyödyllistä tietoa, olisi spektriresoluution oltava kohtuullisen hyvä. Welchin keskiarvoistettujen periodogrammien menetelmässä spektriresoluutiota ja tehospektrin luottamusväliä on vaikea saada yhtäaikaan hyväksi. Spektriresoluution parantaminen leventää luottamusväliä. Luottamusvälin pienentäminen puolestaan heikentää spektriresoluutiota. Welchin menetelmän tässä työssä olennaisten puutteiden vuoksi pääteltiin tehospektriestimaatin asemesta tarkastella suoraan FFT-muunnoksen kertoimia.

4.4 FFT-analyysi

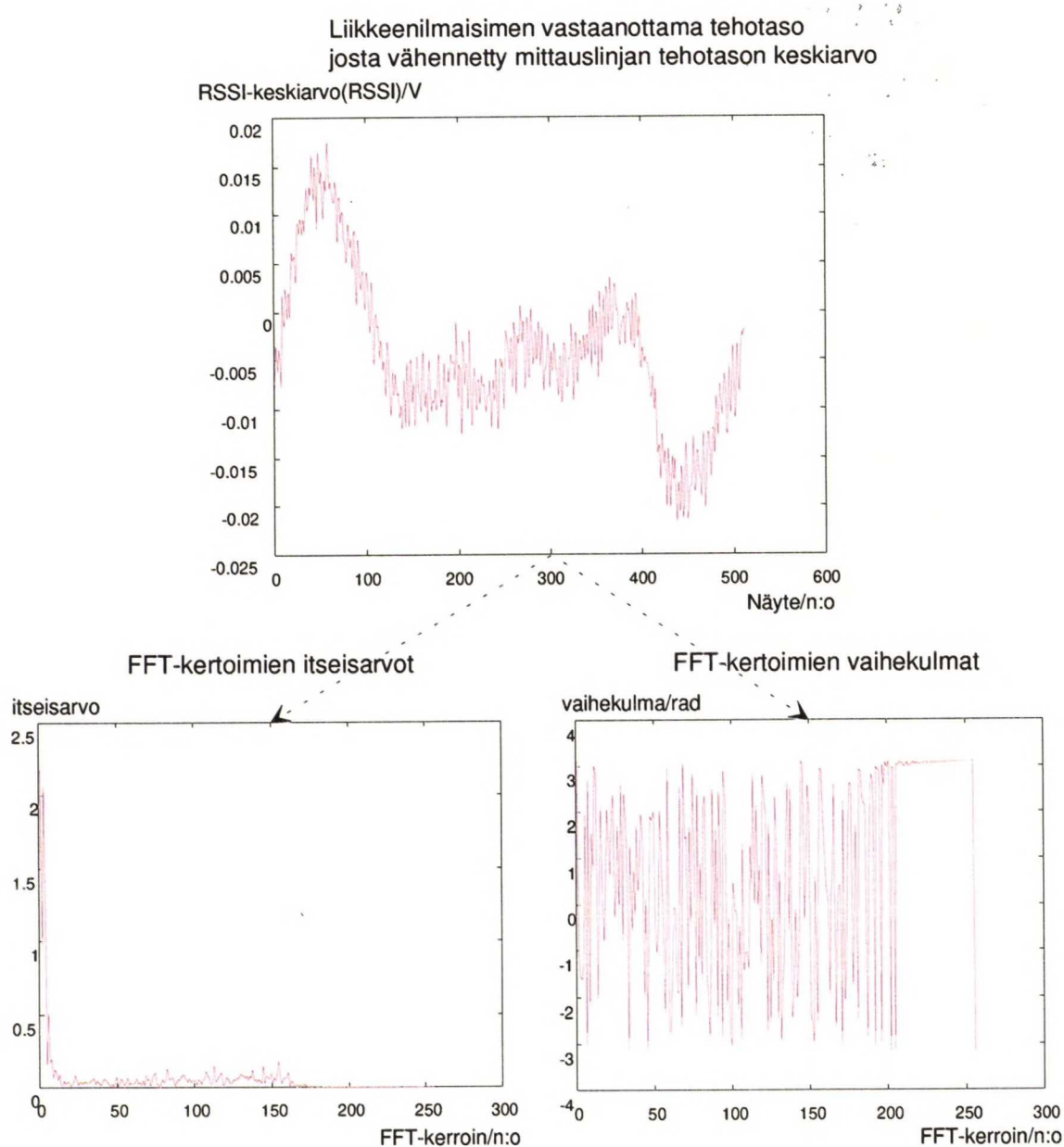
Liikkeenilmaisimen vastaanottimen RSSI-signaali ilmaisee vastaanotetun tehotason. RSSI-signaalista suodatettiin korkeataajuinen kohina 6. asteen Butterworth-alipäästösuodattimella jonka rajataajuus oli 30 Hz. Suodatetusta signaalista poistettiin tasajännitekomponentti vähentämällä signaalista sen

keskiarvo laskettuna yhden mittauksen ajalta. Mitatusta signaalista poimittiin liukuvalla ikkunalla 512 näytteen mittaisia osia FFT:n laskemista varten. Signaalinkäsittelyn ensimmäinen vaihe on esitetty kuvassa 9.



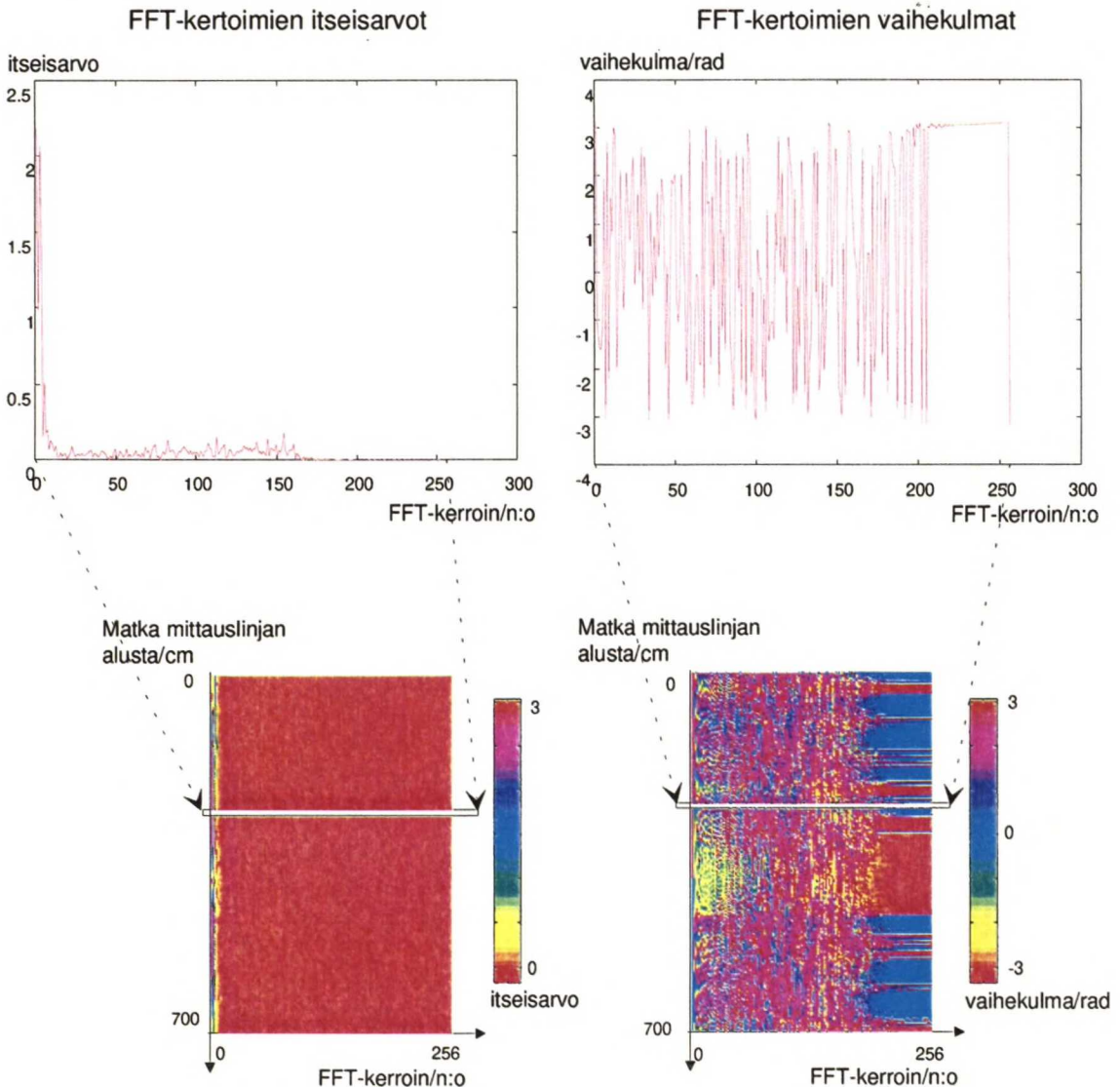
Kuva 9: Liikkeenilmaisimen vastaanottimen havaitsema tehotaso paikan funktiona. Vastaanottimesta saatava signaali suodatetaan 6. asteen Butterworth-alipäästösuodattimella, jonka rajataajuus on 30 Hz. Havaitusta datasta poimitaan liukuvalla ikkunalla 512 näytteen mittainen osa FFT:n laskemista varten. Signaalista poistetaan tasajännitekomponentti.

Suodatetusta signaalista laskettiin 512 pisteen FFT liukuvalla ikkunalla. Kustakin lasketusta FFT:stä otettiin erikseen saatujen FFT-kertoimien itseisarvot ja vaihekulmat jatkokäsittelyyn. Kuvassa 10 on esitetty FFT-kertoimien itseisarvojen ja vaihekulmien muodostamisperiaate.



Kuva 10: FFT:n muodostaminen suodatetusta liikkeenilmaisimen RSSI-signaalista. 512 näytteen mittaisesta otoksesta lasketaan FFT ja saatujen kertoimien 256 ensimmäistä itseisarvoa ja vaihekulmaa esitetään erillisissä diagrammeissa.

Liukuvalla ikkunalla lasketuista FFT-kertoimien itseisarvoista ja vaihekulmista muodostettiin kuva, jossa näkyy 512 pisteen FFT:n kertoimien itseisarvon ja vaihekulmien muutos paikan funktiona. Kuvan muodostamisperiaate on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: FFT-kerroinkarttojen muodostaminen liukuvalla ikkunalla lasketuista FFT:sta. Kohteen liikkuessa liikkeenilmaisimen yli saadaan kartta FFT-kertoimien itseisarvojen ja vaihekulmien muutoksesta paikan funktiona. Kertoimien arvot on esitetty väriskaaloilla, jotka on esitetty kuvassa.

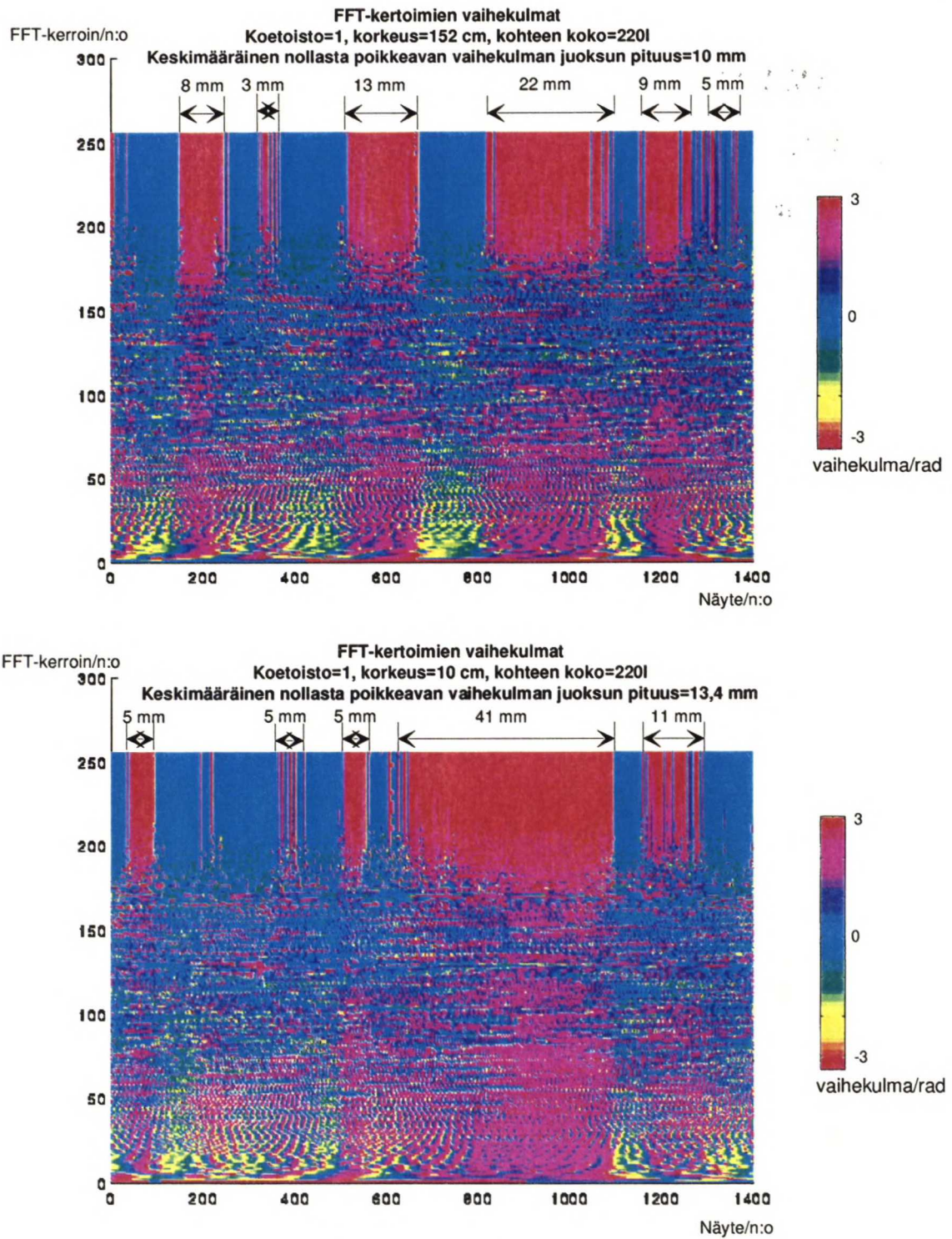
Kussakin mittauslinjan näytteenottopisteessä poimittiin FFT-kertoimien itseisarvoista se, jonka itseisarvo on suurin. Kaikista koejärjestelyjen mittauksista poimittujen kertoimien itseisarvojen indekseistä laskettiin keskiarvo. Näin tutkittiin FFT-kertoimien itseisarvojen maksimin sijoittumista taajuustasossa. Otokoko oli 44800 FFT-muunnosta. Taajuusasteikolle

muunnettuna FFT-kerrointen itseisarvon maksimi oli keskimäärin 0,316 Hz varianssilla 0,107 Hz².

Koejärjestelyssä käytetty kohteiden liikenopeus oli 0,44 m/s mikä vastaa erittäin hidasta kävelyvauhtia. Liikeilmaisimen lähettimen aallonpituus oli 0,66 m. Kohteen liikenopeuden ja FFT-kertoimien itseisarvojen taajuusasteikon maksimikohdan perusteella voidaan laskea liikkeenilmaisimen tehotasosignaalin vaihdelleen noin 1,39 m jaksoissa. Tämä on suunnilleen kaksi kertaa liikkeenilmaisimen lähettimen aallonpituus. Saatujen tulosten perusteella voidaan olettaa, että FFT-kertoimien itseisarvon taajuustason maksimikohtaa tarkkailemalla on mahdollista päätellä kohteen nopeus sen liikkuessa liikkeenilmaisimen antennien yli antennaja vastaan kohtisuorassa linjassa. Sellaisilla nopeuksilla, joilla Doppler-ilmiö ei vielä vaikuta vastaanotettuun tehotasoon, pitäisi FFT-kertoimien itseisarvon maksimin sijoittuminen taajuustasossa olla suoraan verrannollinen kohteen nopeuteen liikkeenilmaisimen antennien vastaan kohtisuorassa suunnassa. Jotta tulos voitaisiin varmentaa, olisi tehtävä koesarja, jossa yhtenä varioitavana faktorina olisi kohteen nopeus. Tässä työssä käytetyllä koelaitteistolla kohteen liikenopeuden varioiminen ei ollut mahdollista.

Tarkasteltaessa FFT-kertoimien vaihekulmaa havaitaan, että kohteen liikkuessa matalalla korkeudella liikkeenilmaisimen antennien ylitse on antennien väliin jäävällä alueella pitkä jakso, jossa FFT-kertoimien itseisarvot ovat $\neq 0$ korkeilla taajuuksilla. Kohteen liikekorkeuden kasvaessa antennien väliin jäävä jakso, jossa FFT-kertoimien itseisarvot ovat $\neq 0$ korkeilla taajuuksilla lyhenee. Toisaalta antennien ulkopuoliselle alueelle jäävät jaksot pitenevät. Ilmiö on esitetty kuvassa 12.

Ilmiötä tutkittiin lineaarisen regression avulla mittaamalla FFT-kertoimien vaihekulmakartoista nolasta poikkeavien vaihekulmajaksojen pituudet viivoittimen avulla ja keskiarvoistamalla ne karttakohtaisesti. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 3.



Kuva 12: FFT-kertoimien vaihekulmien nollasta poikkeavien juoksujen keskimääräisen pituuden muuttuminen korkeuden funktiona. Alempana esitettyssä matalalla korkeudella tehdyssä mittauksessa antennien lähimaastossa on yksi laaja alue, jossa vaihekulmat poikkeavat nollasta. Korkeammalla tehdystä mittauksesta on useita lähes samanpituisia nollasta poikkeavia vaihekulmajuoksua.

Koetoisto	Korkeus	nollasta poikkeavien vaihekulmajaksojen keskimääräinen pituus	Koetoisto	Korkeus	nollasta poikkeavien vaihekulmajaksojen keskimääräinen pituus
1	1	17,75	2	1	20,67
1	1	13,25	2	1	21
1	1	13,75	2	1	15,5
1	1	13,4	2	1	21,67
1	2	10,6	2	2	10,4
1	2	16,25	2	2	14,25
1	2	19	2	2	14,75
1	2	14,25	2	2	14,75
1	3	13,25	2	3	12,8
1	3	14,25	2	3	12,2
1	3	12	2	3	11,6
1	3	15,75	2	3	9,43
1	4	9,33	2	4	11
1	4	9,6	2	4	11,4
1	4	9,4	2	4	11,5
1	4	10	2	4	10,67

Taulukko 3: FFT-kertoimien vaihekulmakartoista mitattujen sellaisten jaksojen pituus, joilla vaihekulma $\neq 0$. Korkeuskoodit: 1=10 cm, 2=54 cm, 3=98 cm, 4=152 cm. Korkeuden kasvaessa nollasta poikkeavien vaihekulmajaksojen keskimääräinen pituus pienenee.

Mittaustuloksiin sovitettiin kaavan (6) mukainen lineaarinen malli.

Mittaustuloksille tehdyn regressioanalyysin tulokset on esitetty kuvassa 13.

Tuloksista havaitaan, että mitattuun dataan voidaan sovittaa lineaarinen malli selitysasteella 0,517. Mallin keskinkertainen selitysaste johtuu mittaustulosten suuresta varianssista erityisesti kohteen ollessa matalalla.

Regressiomallin kerrointen estimaattoreiden tilastollista merkitsevyyttä testattiin hypoteeseilla:

$$H_0: \beta_0 = 0$$

$$H_1: \beta_0 \neq 0$$

sekä

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0$$

Hypoteeseja testattiin kaavan (7) mukaisella testisuureella. Tulokset on esitetty kuvassa 13. Tulosten perusteella kumpikin nollahypoteesi hylätään.

Testisuureen P-arvot ovat pienempiä kuin 0,001. Lineaarisen regressiomallin vakio- ja kulmakertoimen estimaattorit poikkeavat siis nolasta ja ovat mallin kannalta tilastollisesti merkitseviä.

Dep Var: R	N: 32	Multiple R: 0.719	Squared multiple R: 0.517			
Adjusted squared multiple R: 0.501		Standard error of estimate: 2.443				
Effect	Coefficient	Std Error	Std Coef Tolerance	t	P(2 Tail)	
CONSTANT	19.083	1.058	0.0	.	18.041	0.000
H	-2.190	0.386	-0.719	1.000	-5.671	0.000
Analysis of Variance						
Source	Sum-of-Squares	DF	Mean-Square	F-Ratio	P	
Regression	191.932	1	191.932	32.165	0.000	
Residual	179.011	30	5.967			
Durbin-Watson D Statistic		1.822				
First Order Autocorrelation		0.087				

Kuva 13: Lineaarinen regressio kohteen liikekorkeuden maanpinnasta vaikutuksesta FFT-kertoimien nolasta poikkeavien vaihekulmien keskimääräisiin juoksujen pituuksiin 50 Hz:n kaistalla. H=koodattu korkeus, R=keskimääräinen nolasta poikkeavien vaihekulmien juoksun pituus. Mitattuun dataan voidaan sovittaa lineaarinen malli selityssasteella 0,517.

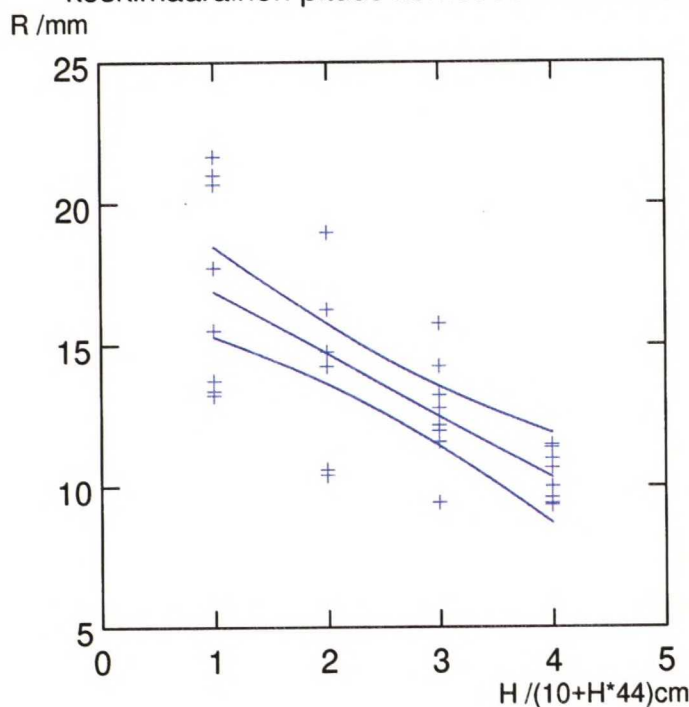
Regressioyhtälöksi saadaan:

$$R = 19,083 - 2,190H$$

(15)

jossa H on koodattu korkeus ja R on FFT-kertoimien nolasta poikkeavien vaihekulmien juoksun keskimääräinen pituus 50 Hz:n kaistalla. Mitattu data ja siihen sovitettu regressiosuora 90% luottamusväleineen on esitetty kuvassa 14.

FFT-kertoimien vaihekulmien positiivisten juoksujen
keskimääräinen pituus korkeuden funktiona



Kuva 14: FFT-kertoimien nolasta poikkeavien vaihekulmien juoksujen pituus 50 Hz:n kaistalla korkeuden funktiona. Mitattuun dataan on sovitettu regressiosuora. Kuvassa näkyy lisäksi regressiosuoran 90% luottamusväli. R=juoksun pituus, H=korkeus

Lineaarisen mallin soveltuvuutta mitatun datan kuvaamiseen tutkittiin lack-of-fit -testillä. Hypoteesit ovat:

H_0 : Lineaarinen regressiomalli on riittävä ilmiön kuvaamiseen

H_1 : Lineaarinen regressiomalli ei ole riittävä ilmiön kuvaamiseen

Lack-of-fit -testin tulokset on esitetty kuvassa 15. Tilastollinen ohjelma laskee korkeus-muuttujan $X(1)$ vapausasteet väärin, koska se ei ota huomioon regressiokertoimien estimointiin kuluneita vapausasteita. $X(1)$:n oikea vapausastelukumäärä olisi 1 ja näin ollen keskineliösummaksi tulee 2.034 ja F-arvoksi 0,322. Nollahypoteesia ei tuloksen perusteella voi hylätä joten lineaarisen regressiomallin käyttö on perusteltua.

Categorical values encountered during processing are:

X(1) (4 levels)
1, 2, 3, 4

Dep Var: RESIDUAL N: 32 Multiple R: 0.107 Squared multiple R: 0.011

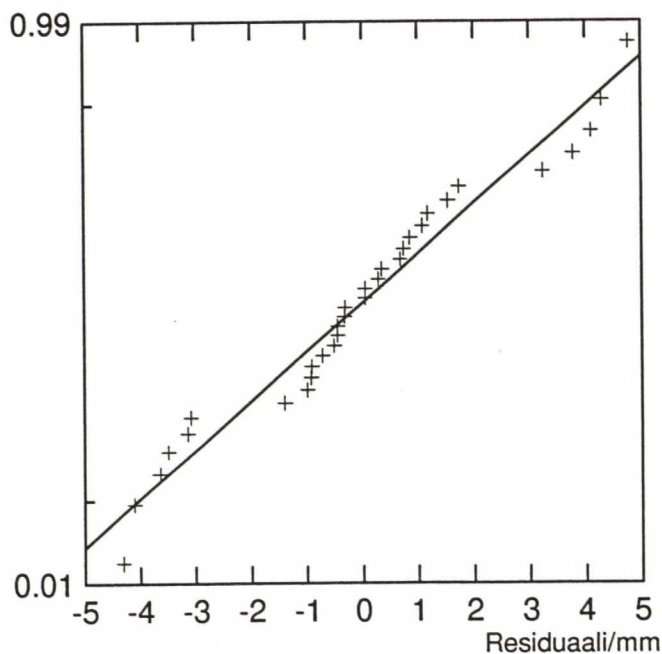
Analysis of Variance					
Source	Sum-of-Squares	DF	Mean-Square	F-Ratio	P
X(1)	2.034	3	0.678	0.107	0.955
Error	176.977	28	6.321		

Kuva 15: Lack-of-fit -testin tulokset kohteen liikekorkeuden ja FFT-kertoimien vaihekulmien nollasta poikkeavien juoksujen keskimääräisen pituuden välille saadun regressiomallin riittävyyden tutkimiseksi. Testituloksen perusteella lineaarinen regressiomalli on riittävä ilmiön mallintamiseen.

Regressioanalyysin perusolettamuksiin kuuluu, että residuaalit ovat normaalijakautuneita keskiarvolla nolla. Perusolettamuksen tarkastamiseksi residuaalien normaalijakautuneisuutta tutkittiin kuvassa 16 esitetyn todennäköisyysdiagrammin avulla.

Todennäköisyysdiagrammi residuaalien jakaumasta

Odotettu osuus datasta normaalijakaumalle

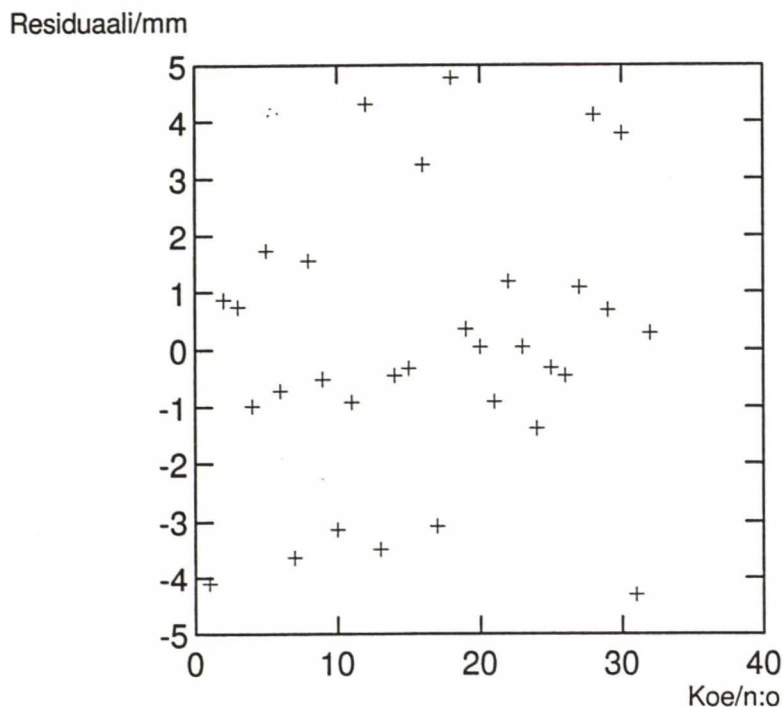


Kuva 16: Todennäköisyysdiagrammi regressioanalyysin residuaalien jakaumasta. Residuaalit ovat likimain suorassa linjassa. Suurin osa residuaaleista on lähellä keskipistettä. Residuaalit ovat likimain normaalijakautuneita.

Diagrammissa residuaalit ovat likimain suoralla linjalla. Suurin osa residuaaleista on diagrammin keskikohdan paikkeilla. Suurin normeerattu residuaali on 1.9. Normalisoitujen residuaalien tulisi olla alle 3, jotta edelleen voidaan olettaa niiden olevan normaalijakautuneen satunnaisprosessin tulosta. Todennäköisyysdiagrammin perusteella residuaalit ovat normaalijakautuneita keskiarvolla nolla. Regressioanalyysin residuaaleille asettama muodollinen vaatimus toteutuu.

Residuaaleja tarkasteltiin kokeiden suoritusjärjestyksessä, jotta havaittaisiin ilmeneekö residuaaleissa aikariippuvaista säännönmukaisuutta. Tulos on esitetty kuvassa 17. Residuaaleissa ei näyttäisi olevan systemaattisesta virheestä johtuvaa aikariippuvaisuutta. Regressioanalyysin tuloksia ei siis voi kyseenalaistaa residuaalien ajan suhteen käyttäytymisen perusteella.

Residuaalit mittausjärjestyksessä

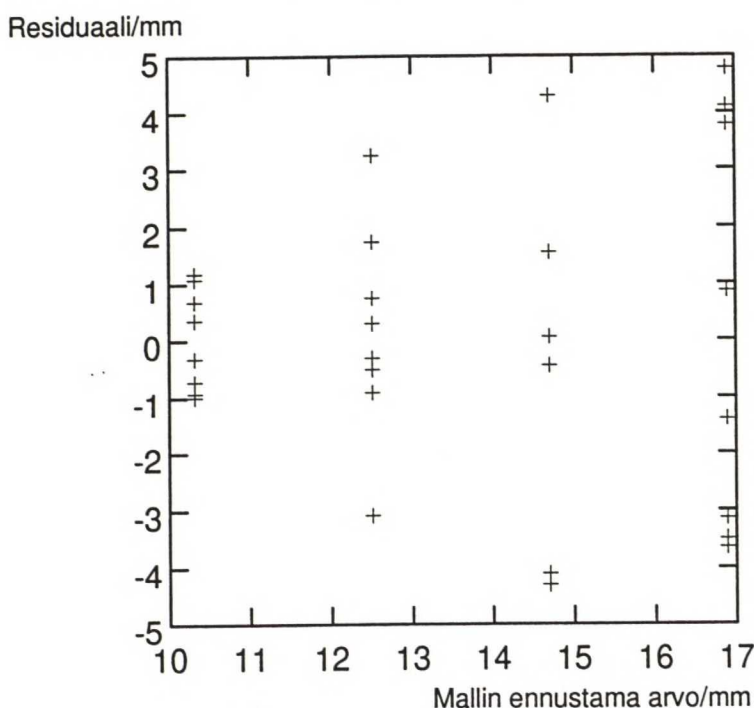


Kuva 17: Regressiomallin residuaalit kokeiden suoritusjärjestyksessä. Residuaaleissa ei ole havaittavissa aikasidonnaista trendiä. Regressioanalyysin antamia tuloksia ei voi kyseenalaistaa residuaalien ajan suhteen käyttäytymisen perusteella.

Residuaalien tulisi käyttäytyä tarkastelualueella siten, että niiden hajonta on suunnilleen samanlainen koko tarkastelualueella. Kuvassa 18 on esitetty

residuaalit mallin ennustamien arvojen funktiona. Kuvasta 18 havaitaan, että residuaalien hajonta on hieman pienempi kohteen liikkeessa korkeimmalla koesarjassa käytetyllä korkeudella kuin pienemmillä korkeuksilla. Muuten residuaalien hajonta näyttäisi olevan suhteellisen tasainen tarkasteltavalla alueella. Pieni poikkeama suurella kohteen liikekorkeudella ei anna perusteita epäillä tehdystä analyysistä saatuja tuloksia.

Residuaalit lineaarisen regressiomallin ennustamien arvojen funktiona



Kuva 18: Regressioanalyysin residuaalit mallin ennustamien arvojen funktiona. Kuvasta havaitaan, että residuaalit käyttäytyvät likimain samalla lailla regressiomallin kattamalla alueella lukuunottamatta alhaisia ennusteen arvoja, jotka vastaavat kohteen liikettä korkealla. Residuaalien käyttäytyminen ei anna aihetta epäillä regressioanalyysistä saatuja tuloksia.

4.5 Liikkeenilmaisimen ilmaisumenetelmän kehittäminen

Tässä työssä saatujen tulosten pohjalta on mahdollista kehittää liikkeenilmaisimeen ilmaisumenetelmä, joka toimii huomattavasti luotettavammin kuin alkuperäisessä prototyypissä oleva pelkkään tasomuutokseen perustuva ilmaisumenetelmä. Uusi ilmaisumenetelmä

perustuu tehotasosignaalista laskettujen FFT-muunnosten kertoimien amplitudin tarkasteluun. Ilmaisumenetelmä on seuraavanlainen:

1. Tarkkaillaan liikkeenilmaisimen vastaanottimesta saatavaa received signal strength indicator -signaalia. Signaalia alipäästösuodatetaan kohinan eliminoimiseksi. Signaalista poistetaan tasajännitekomponentti. Suodatetusta signaalista lasketaan jatkuvasti liukuvalla ikkunalla FFT-muunnos reaaliajassa.
2. Tarkkaillaan laskettujen FFT-kertoimien itseisarvoja. Kun liikkeenilmaisimen lähimaastossa ei liiku kohdetta, pysyvät kaikki FFT-kertoimien itseisarvot alhaisella tasolla. Kohteen tullessa liikkeenilmaisimen lähimaastoon kasvavat FFT-kertoimien itseisarvot kaistalla, joka on verrannollinen kohteen nopeuteen. Mikäli FFT-kertoimien itseisarvot pysyvät korkealla tasolla niin kauan, että voidaan todeta olevan kyse muusta kuin satunnaisvaihtelusta, liikkuu liikkeenilmaisimen lähimaastossa kohde. Kohteen nopeus voidaan selvittää sen perusteella, millä kaistalla FFT-kertoimien itseisarvot kasvavat.
3. Kun ollaan varmistuttu, että liikkeenilmaisimen lähimaastossa liikkuu kohde, tarkkaillaan FFT-kertoimien vaihekulmaa ja itseisarvoa. FFT-kertoimien nollasta poikkeavien juoksujen keskimääräisiä pituuksia tarkkailemalla voidaan karkeasti arvioida korkeus, jolla kohde liikkuu.

Mikäli kohteen nopeus muuttuu sen liikkuessa liikkeenilmaisimen antennilankojen yli, nopeuden muutos näkyy taajuustasossa Fourier-kertoimien itseisarvojen maksimiarvon siirtymisenä uutta nopeutta vastaavalle taajuuskaistalle. Kohteen nopeutta sen liikkuessa antennilankojen yli voidaan näin ollen siis seurata tarkkailemalla FFT-kertoimien itseisarvoihin sovitettun sopivan käyrän maksimikohdan sijoittumista taajuustasossa.

Työssä kehitetyllä uudella kohteen ilmaisumenetelmällä on seuraavat ominaisuudet:

1. Havaitsee kohteen saapumisen liikkeenilmaisimen lähimaastoon.
2. Pystyy arvioimaan kohteen nopeuden karkeasti.

3. Pystyy karkeasti arvioimaan korkeuden, jolla kohde liikkuu.

5. Luotettavuusanalyysi

Luvussa tarkastellaan ympäristötekijöiden ja mittaustarkkuuden vaikutusta mittaustilanteessa. Tehdyt yksinkertaistukset ja olettamukset esitellään. Mittausaineiston määrän vaikutusta koetuloksiin arvioidaan. Koejärjestelystä pois jätetyt faktorit esitellään ja niiden mahdollisia vaikutuksia liikkeenilmaisimen toimintaan yritetään arvioida.

5.1 Ympäristötekijöiden vaikutukset

Koeympäristö pyrittiin pitämään mahdollisimman vakiona. Ilmankosteuden vaihtelua oli käytetyssä tilassa mahdotonta kontrolloida. Mitattu vaihtelu oli kuitenkin erittäin pientä. Lämpötila oli myös lähes vakio mittausten ajan.

Hallissa oli paljon metalliesineitä, jotka saattavat vaikuttaa liikkeenilmaisimen toimintaan. Hallin lattia oli raudoitettua betonia. Raudoituksen tiheydestä ja tarkasta paikasta ei luonnollisestikaan ole tietoa. Raudoituksella saattaa olla vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan. Liikkeenilmaisimen antennit oli asennettu kiinni lattiaan, joten niiden etäisyys lattiaraudoituksiin saattoi olla hyvinkin pieni. Kun antennit TTKK:n kokeissa asennettiin verkkoaitaan, pieneni liikkeenilmaisimen herkkyys huomattavasti verrattuna metsämaastossa suoritettuihin kokeisiin. TTKK:n tutkijat pitivät syypäänä antennien välissä olevia metallilankoja. Lattiarauditus saattaa aiheuttaa samantapaisen ilmiön. Liikkeenilmaisimen saattaisi siis olla herkempi todellisessa käyttöympäristössä metsässä. Metsässä maaperä saattaa vaikuttaa tietysti paljonkin liikkeenilmaisimen herkkyyteen, jolloin efekti ääritapauksessa saattaisi olla samaa luokkaa kuin raudoitetusta betonista tehdyn lattian.

Maastokokeiden teko on vaikeaa, koska kohteiden liikuttelu liikkeenilmaisimen läheisyydessä on vaikea maastossa tehdä hallitusti. Mikäli mittauslaitteiston vaikutus vastaanotettuun tehotasoon halutaan minimoida, olisi kohteiden liikuttelulaitteisto valmistettava jostain sähkömagneettiseen säteilyyn mahdollisimman vähän vaikuttavasta aineesta. Todellisten kohteiden käyttö

olisi yksi tapa tehdä kokeita. Ongelmaksi tulee kuitenkin esimerkiksi eläimiä käytettäessä eläimen nopeuden ja paikan määrittäminen ajan funktiona.

5.2 Yksinkertaistukset ja olettamukset

Kohteet on työssä tehdyissä kokeissa yksinkertaistettu äärimmilleen. Todellinen liikkeenilmaisimen ympäristössä liikkuva kohde on huomattavasti monimutkaisempi kuin tässä työssä käytetyt muoviset suolaliuossäiliöt. Tehdyt kokeet antavat viitteitä siitä, että kohteen geometrialla saattaa olla paljonkin vaikutusta liikkeenilmaisimen vastaanottamaan tehotasoon. Jatkotutkimuksissa olisi huolellisesti analysoitava kohteen geometrian vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan, mikäli analysointi on mahdollista.

Koejärjestelyä suunniteltaessa on oletettu, että käytetyn lentokonehallin katon rajassa liikkuva nosturi on niin kaukana lattiaan asennetusta liikkeenilmaisimesta, että nosturin sähkömagneettiseen kenttään aiheuttamat muutokset ovat häviävän pieniä. On mahdollista, että nosturin metallirungon vaikutus liikkeenilmaisimen toimintaan on oletettua suurempi. Oletettua suuremman vaikutuksen pitäisi tulla esiin maastossa myöhemmin tehtävissä kokeissa. Toisaalta nosturin aiheuttama liikkeenilmaisimen signaalin muutos pitäisi olla samansuuruinen kaikilla käytetyillä kohteilla. Sen vaikutus pitäisi siis tarvittaessa olla mahdollista analysoida pois mittausdatasta. Nosturin korvaaminen sähkökenttään minimaalisesti vaikuttavalla laitteistolla tehdyissä kokeissa mallia liikuttavana mekanismina olisi ollut erittäin työlästä ja kallista.

5.3 Mittausaineiston määrä

Tilastollisen analyysin kannalta koetoistoja pitäisi olla huomattavasti enemmän, jotta voitaisiin saada tilastollisesti merkitsevämpiä tuloksia. Kokeiden tekeminen käytetyllä koejärjestelyllä on kuitenkin erittäin hidasta ja kallista. Kohteen korkeuden vaikutusta liikkeenilmaisimen vastaanottamaan tehotasoon selvitetessä olisi mittauslinjojen oltava lähempänä toisiaan, mielellään noin yhden viidesosa-aallonpituuden päässä toisistaan. Tällöin kuitenkin tehtävien kokeiden määrä kasvaa erittäin suureksi.

Kohteen korkeutta arvioivan regressioanalyysin osalta mittausdataa oli tarpeeksi. Kaksikymmentäviisi mittaupistettä on minimimäärä, jolla

regressioanalyysin voidaan katsoa olevan mielekästä. Kohteen korkeutta arvioivassa regressioanalyysissä käytettiin 32 mittauspistettä. Antennien välisen etäisyyden merkitystä arvioivassa koesarjassa mittauspisteitä oli 42.

5.4 Mittaustarkkuus

Suolaliuossäiliön heiluminen kiinnitysköytensä varassa aiheuttaa jonkin verran epätarkkuutta kohteen paikan määrittämiseen. Nosturin liikkeessä tasaisella nopeudella pitkällä köydellä nosturiin kiinnitetty suolaliuosastia ei liiku tasaisella nopeudella. Suolaliuosastia heilahtelee jonkin verran edestakaisin. Liikkeen laajuutta ei voinut koejärjestelytilanteessa arvioida kuin silmämääräisesti. Heilahtelu oli silmämääräisesti arvioituna noin ± 20 cm taajuudella heilahdus / 5s. Jatkoanalyysissä käytettyyn taajuustason tarkasteluun heilahtelulla ei pitäisi olla suurta merkitystä.

Mikrotietokoneeseen kiinnitetyn datankeruukortin mittaustarkkuus käytetyllä ± 10 V jännitealueella on $\pm 0,45$ mV. Datankeruulaitteiston mittaustarkkuus on siis tehdyn analyysin kannalta riittävän hyvä. Datankeruulaitteiston kalibrointi tarkastettiin oskilloskoopin avulla.

5.5 Tutkimuksen ulkopuolelle jätettyjen faktoreiden vaikutukset

Työssä keskityttiin kohteen tunnistamisen kannalta olennaisten faktoreiden tarkkailuun. Liikkeenilmaisimen signaalin muodostumiseen vaikuttavat kuitenkin useat faktorit, jotka tässä työssä on yritetty vakioda mahdollisimman hyvin. Todellisessa käyttötilanteessa liikkeenilmaisim joutuisi kuitenkin hyvinkin vaihtelevan ympäristöön luontoon. Jotta liikkeenilmaisimeen kehitettyyn ilmaisulogiikkaan voisi todella luottaa, olisi tässä työssä tutkimatta jääneiden faktoreiden vaikutuksia toimintaan arvioitava. Työssä saadut tulokset ovat arvokkaita. On tietenkin mahdollista, että jatkotutkimuksissa havaitaan jonkin uuden faktorin vaikutusten peittävän alleen tässä työssä tutkittujen faktoreiden vaikutukset. Tällainen tilanne vaikuttaa kuitenkin saatujen tulosten valossa epätodennäköiseltä.

Työssä liikkeenilmaisimeen oli asennettu lyhyet antennikaapelit. Antennikaapelien pituus oli vain 13,5 m. Todellisessa käyttötilanteessa antennikaapelien tulisi olla huomattavasti pidemmät. Käytökelpoinen antennien

pituuks olisi noin 150 m. Antennien pituuden vaikutusta signaalin voimakkuuteen ja kentän yhdenmukaisuuteen liikkeenilmaisimen lähimaastossa olisi tutkittava ennen kuin liikkeenilmaisimen voitaisiin ottaa operatiiviseen käyttöön. Työssä käytetyt lyhyet antennikaapelit ovat eräänlainen optimitalaus, jossa signaalin vaimeneminen ei vaikuta sähkömagneettiseen kenttään antennien lähimaastossa.

Antennien asennussuunta maastossa kannattaa valita siten, että kohteet todennäköisimmin liikkuisivat kohtisuoraan antennien yli. Liikkeenilmaisimen sähkömagneettinen kenttä on homogeeninen antennien pituussuunnassa. Antennien suuntaisesti liikkuva kohde aiheuttaa täten pientä vaihtelua vastaanotettuun signaaliin. Kohtisuoraan antennien yli liikkuva kohde taas aiheuttaa mahdollisimman suuria vaihteluita vastaanotettuun signaaliin. Mahdollisimman suuret vaihtelut vastaanotetussa signaalissa ovat ilmaisun kannalta toivottu ominaisuus.

Antennilankojen kiertymisen vaikutus liikkeenilmaisimen signaaliin olisi selvitettävä jatkotutkimuksilla. Ilmiöllä on perustavaa laatua oleva merkitys liikkeenilmaisimen käytännön asennuksen helppouteen. Parikaapelin kiertymisellä on suuri merkitys kaapelin säteilemään kenttään. Tässä työssä saadut tulokset ovat osin riippuvaisia siitä, että liikkeenilmaisimen sähkömagneettinen kenttä on antennilankojen pituussuunnassa kohtuullisen homogeeninen. Mikäli antennikaapeleissa esiintyy voimakasta paikallista kiertymistä, muuttuu liikkeenilmaisimen sähkömagneettinen kenttä todennäköisesti siten, että siinä saattaa olla suuriakin vaihteluita antennien pituussuunnassa tarkasteltuna. Tällaisessa tilanteessa liikkeenilmaisimen toiminta ei enää olisi samanlaista antennilankojen koko matkalla. Antennilankojen kiertymisen vaikutuksesta on saatava lisää tietoa, jotta liikkeenilmaisimen asennustoleranssit voidaan arvioida.

Antennien asennuskorkeus maanpinnasta oli tässä työssä vakioitu. Sillä on todennäköisesti vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan. Ilmiön tutkiminen voidaan kuitenkin jatkossa sivuuttaa, koska antennit voidaan tarvittaessa aina asentaa kiinni maanpintaan.

Kohteen materiaalin vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan ei tutkittu.

Metalliset kohteet vaikuttavat todennäköisesti eri tavalla liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin kuin eloperäiset kohteet, koska metallit ovat lihaskudosta johtavampia. Liikkeenilmaisimen lähettämä signaali heijastuu voimakkaasti metallista ja todennäköisesti voimistaa vastaanotetussa signaalissa havaittavaa vaihtelua.

Maaperän vaikutusta liikkeenilmaisimen toimintaan on erittäin vaikea todentaa kokeellisesti. Todennäköisesti ainoa tapa saada tietoa ilmiön vaikutuksesta liikkeenilmaisimen toimintaan on tehdä käytännön kokeita paikoissa, joissa maaperän koostumus on likimain tunnettu. Erittäin hyvin johtavan maaperän vaikutus liikkeenilmaisimen toimintaan saattaa olla mielenkiintoinen, koska on mahdollista että liikkeenilmaisimen herkkyys kärsii huomattavastikin antennien välille muodostuvan vahvan kapasitiivisen kytkennän vaikutuksesta. Tilanteesta on kokeellista tietoa TTKK:n tutkimusten pohjalta. Tutkimuksissa liikkeenilmaisimien asennettiin metalliverkkoaitaan. Tällöin se lakkasi havaitsemasta liikettä lähiympäristössään. TTKK:n tutkijoiden mielestä ilmiön todennäköisin selitys oli antennien välissä oleva vahvasti johtava kappale eli metalliverkkoaita.

Sääolosuhteiden vaikutuksen merkitystä on myös kokeellisesti vaikea todentaa. Näissä mittauksissa sääolosuhteet pysyivät likipitäen vakioina halliolosuhteiden ansiosta. Sääolosuhteet vaikuttavat kuitenkin sähkömagneettisten aaltojen etenemiseen. Teoriassa sääolosuhteet joko nostavat tai laskevat vastaanottimen havaitsemaa tehotasoa. Vastaanottimen havaitsema tehotason muutos on suoraan verrannollinen sääolosuhteiden muutoksen nopeuteen. Äkillisesti alkava sadekuuro aiheuttaa nopean muutoksen vastaanotetussa tehotasossa. Sateen jatkuessa vastaanotettu tehotaso vakiintuu uudelle tasolle. Täten muutos vaikuttaa lyhytaikaisesti ja uusi ilmaisumenetelmä karsii tämän tyyppiset virrehälytykset, koska ilmaisumenetelmä ei enää perustu pelkkään tasomuutokseen. Lumen vaikutusta ei arvioida, koska liikkeenilmaisimien on tarkoitettu toimimaan kesäolosuhteissa.

Kaiken kaikkiaan tutkimuksen ulkopuolelle jätettyjen faktoreiden vaikutuksesta liikkeenilmaisimen toimintaan on vaikea esittää arviota. Suurimmalla osalla tutkimatta jätetyistä faktoreista on todennäköisesti havaittava vaikutus

liikkeenilmaisimen signaaliin, mutta eri faktoreiden vaikutusten suuruuseroista ei voida päätellä mitään. Faktoreiden suuri määrä aiheuttaa suuria hankaluuksia yhteisvaikutusten kokeellisessa testaamisessa. Kahden yksittäisen faktorin vaikutus saattaa olla pieni, mutta samojen faktoreiden vaikutus yhdessä saattaa olla huomattavakin. Erilaisten yhteisvaikutusten määrä liikkeenilmaisimen kaltaisen laitteen tapauksessa on niin suuri, että niiden todentaminen kokeellisesti lienee lähes mahdotonta. Joitain faktoreita on lisäksi vaikeaa tai mahdotonta kontrolloida koetilanteessa.

6. Johtopäätökset ja suositukset

Luvussa esitellään työstä saadut tulokset. Saatujen tulosten vaikutusta liikkeenilmaisimen mahdolliseen jatkokehittämiseen arvioidaan. Jatkokehityksen pohjaksi annetaan suosituksia tarvittavista toimenpiteistä. Työn tavoitteet toteutuivat osittain. Liikkeenilmaisimen ulostulosignaalista ei voida tehdä johtopäätöksiä kohteen koosta. Kohteen nopeus ja korkeus jolla se liikkuu voidaan arvioida karkeasti liikkeenilmaisimen ulostulosignaalin perusteella. Saadut tulokset olisi verifioitava todellisilla kohteilla. Numeeristen simulaatioiden tekomahdollisuutta mallilla, jossa liikkeenilmaisimen kokoa on pienennetty laskennallisesti riittävän paljon on mahdollista arvioida tässä työssä saatujen tulosten avulla. Uusien koesarjojen avulla olisi hankittava lisää tietoa kohteen nopeuden vaikutuksesta liikkeenilmaisimesta saatavaan signaaliin. Liikkeenilmaisimen asennukseen liittyvät kysymykset olisi selvitettävä. Antennit pitää asentaa tarkasti oikealle etäisyydelle toisistaan. Antennien välisen etäisyyden tulee olla vakio koko matkaltaan. Liikkeenilmaisimesta kannattaisi rakentaa uusi prototyyppi, jossa olisi tässä työssä esitellyn kaltainen ilmaisinelektroniikka.

6.1 Kohteen korkeuden arviointi

Työssä saatujen tulosten perusteella kohteen liikekorkeus voidaan arvioida karkeasti. Tämä tieto on hyödyllinen arvioitaessa pitääkö ilmaisimen hälytykseen reagoida. Erityisesti lintujen aiheuttamat virrehälytykset voidaan karsia korkeustiedon perusteella. Tässä työssä saatuja tuloksia tulisi kuitenkin verrata oikeassa käyttöympäristössä oikeista kohteista saataviin signaaleihin, jotta voitaisiin todentaa toimiiko mekanismi myös aidossa toimintaympäristössä.

Jatkossa tulisi myös selvittää, kuinka vahvasti kohteen geometria vaikuttaa ilmaisinsignaalista saatavaan korkeustietoon. Esimerkiksi hirven ja jäniksen aiheuttamista ilmaisinsignaaleista saattaisi olla mahdollista tehdä johtopäätöksiä kohteen tyypistä, koska näissä kohteissa massa on keskittynyt huomattavan erilaisille korkeuksille. Ihminen puolestaan on korkea kohde, jossa massa on jakautunut kohtalaisen tasaisesti maanpinnasta aina jopa parin metrin korkeudelle asti. Jatkotutkimuksissa olisi keskityttävä selvittämään todellisilla kohteilla mitattujen signaalien ominaisuuksia tässä työssä saatujen havaintojen valossa.

6.2 Ilmaisumenetelmän tuoma lisäarvo

Työssä kehitelty kohteen ilmaisumenetelmä on huomattavasti käyttökelpoisempi kuin alkuperäisen prototyypin. Alkuperäisen prototyypin tasomuutoksen perustuva ilmaisu on herkkä useille erityyppisille häiriöille. Liikkeenilmaisimen lähiympäristössä tuulen vaikutuksesta heiluvat kasvit voivat aiheuttaa hälytyksen. Samoin esimerkiksi äkillinen sadekuuro saattaa aiheuttaa virrehälytyksen. Tässä työssä esiteltyn taaajuustason tarkasteluun perustuvassa ilmaisumenetelmässä äkilliset häiriöt eivät aiheuta virrehälytyksiä. Toisaalta esitellyssä ilmaisumenetelmässä oletetaan, että kohde liikkuu pysähtelemättä. Liikkeenilmaisimen oletettua käyttötilannetta tarkasteltaessa tätä oletusta voidaan pitää perusteltuna. Liikkeenilmaisinta on tarkoitus käyttää lähinnä syrjäisten maastossa sijaitsevien kulku-urien valvontaan. Syrjäisessä maastossa liikkuvan kulkijan ei oleteta etenevän erityisen varovasti tai pysähdellen.

Tässä työssä esitetyn ilmaisumenetelmän tehokkuutta mitattiin laskemalla alkuperäisen prototyypin signaalin tasomuutokseen perustuvalla ilmaisumenetelmällä hälytysten määrä kohteen ylittäessä liikkeenilmaisimen antennit. Hälytyksiä tuli neljäkymmentäyksi kappaletta. Tässä työssä esitellyllä ilmaisumenetelmällä samalla mittausdatalla tulee vain yksi hälytys.

6.3 Antennien asennuksen merkitys liikkeenilmaisimen toimintaan

Antennien välisellä etäisyydellä on merkitystä liikkeenilmaisimen herkkyyteen. Tällä perusteella liikkeenilmaisimen antennien asentaminen on tehtävä tarkasti,

jotta herkkyys saadaan pysymään hyvänä liikkeenilmaisimen kattamalla alueella. Liikkeenilmaisimen prototyypin ensimmäisten käyttökokeiden perusteella arvioitiin, että antennit voidaan asentaa suuripiirteisesti maastoon.. Ilmaisun luotettavuuden säilyttämiseksi antennilankojen on oltava alle 10 cm tarkkuudella samalla etäisyydellä toisistaan koko liikkeenilmaisimen kattamalla alueella. Tällä asennustarkkuudella kohteen liikkeen aiheuttama kokonaismuutos liikkeenilmaisimen vastaanottimen signaaliin laskee korkeintaan noin 20 %.

Näiden uusien rajoitusten valossa liikkeenilmaisimen asennus vaatii huomattavasti enemmän tarkkuutta kuin alun perin näytti. Mikäli antennilankojen asentamiseen maastoon vakioetäisyydelle toisistaan ei kehitetä helppokäyttöistä ja varmaa menetelmää, saattaa liikkeenilmaisimen asentaminen osoittautua käytännössä liian hankalaksi toimenpiteeksi. Mikäli jatkotutkimuksissa lisäksi selviää, että liikkeenilmaisimen on kovin herkkä antennilankojen kiertymiselle, vaikeutuu asennustyö maastoon edelleen huomattavasti. Liikkeenilmaisinta käytetään tyypillisesti siten, että ilmaisimen asennetaan yhteen paikkaan, jossa sitä käytetään hyvinkin pitkiä aikoja kerrallaan. Asennuksen monimutkaisuus ei siis välttämättä merkitse sitä, että liikkeenilmaisimen käytettävyyttä olisi huono. Liikkeenilmaisinta joka on vaikea asentaa ei operatiivisessa toiminnassa voida käyttää ilmaisimena, jota siirrellään nopeasti paikasta toiseen pistokoetyyppisen liikkeen valvonnan aikaansaamiseksi.

6.4 Tulosten verifiointi

Tässä työssä saadut tulokset on hankittu käyttämällä suolaliuosastioita kohteiden malleina. Jatkossa olisi selvitettävä kuinka hyvin oikeiden kohteiden aiheuttama ilmaisinsignaali vastaa yksinkertaistetun mallin vastaavaa. Aluksi olisi hyödyllisintä kerätä halliolosuhteissa esimerkkidataa liikkeenilmaisimen vastaanottamasta signaalista eri nopeuksilla liikkuvista ihmiskohteista. Tässä työssä ei käytetty ihmiskohteita, koska haluttiin tutkia liikkeenilmaisimen toimintaa mahdollisimman ideaalisella kappaleella ja näin eristää esimerkiksi käsien ja jalkojen heilumisesta johtuvat ilmiöt jatkoanalyysistä pois. Ihmiskohteilla tehtäviä koesarjoja voitaisiin hyvinkin tehdä sisäolosuhteissa.

Halliolosuhteissa tehtävien kokeiden jälkeen liikkeenilmaisinta tulee kokeilla aidossa käyttöympäristössä. Erityisen tärkeää olisi saada esimerkkidataa todellisista luonnossa esiintyvistä kohteista siten, että kohteiden keskimääräinen nopeus ja mahdollisesti korkeus saataisiin taltioitua. Luonnossa tapahtuva koejärjestely lienee vaikea toteuttaa. Järjestely olisi myös todennäköisesti vaikea automatisoida. Lähinnä tulee mieleen videokameran asentaminen liikkeenilmaisimen antennien suuntaisesti. Tällöin voitaisiin hälytyksen aiheuttaneiden kohteiden liikkeet taltioida ja analysoida liikkeenilmaisimelta saatava signaalidata videonauhalla saatavan informaation avulla.

6.5 Uuden prototyypin rakentaminen

Liikkeenilmaisimesta kannattaisi rakentaa uusi prototyyppi, johon olisi rakennettu tässä työssä esitettyyn ilmaisumenetelmään perustuva ilmaisuelektroniikka. Samalla voitaisiin selvittää liikkeenilmaisimen kotelointiratkaisuja sekä virrankulutusta. Liikkeenilmaisimen käyttökelpoisuutta arvioitaessa tärkeinä kriteereinä ovat laitteen koko ja virrankulutus. Ennen kuin laitteen käytettävyyttä rajan vartiointiin voidaan arvioida, täytyy liikkeenilmaisimen käytännön toteutuksesta saada lisää tietoa.

Tässä työssä esitetty uusi ilmaisumenetelmä on kätevintä toteuttaa liikkeenilmaisimeen asennettavalla tietokoneella. Tietokoneessa olisi oltava riittävästi laskentatehoa, jotta FFT voidaan laskea uuden ilmaisumenetelmän kannalta riittävän nopeasti. Tietokoneessa olisi myös oltava kohtalaisen paljon muistia, jotta näytteitä voidaan tallentaa riittävän pitkältä ajalta. Pienessä koossa olevia modulaarisia ja riittävän tehokkaita tietokoneita on nykyään saatavilla kaupallisesti. Kyseisten tietokoneiden hinnat ovat muutamien tuhansien markkojen luokkaa.

Signaalin esikäsittelyssä tarvittava suodatus voidaan hoitaa joko digitaalisella tai analogisella suotimella. Digitaalisen suotimen etuna on helppo päivitettävyyys: mikäli jatkossa ilmenee että esikäsittelymenetelmää muuttamalla voidaan saada lisää informaatiota kohteen ominaisuuksista, voidaan signaalinkäsittelyosaa muuttaa päivittämällä ohjelmisto laitteen muistiin.

Laitteen virrankulutusta voidaan vähentää pitämällä ilmaisimen signaalinkäsittelyosaa lepotilassa. Ilmaisussa voidaan käyttää kaksivaiheista käsittelyä. Alkuperäisessä prototyypissä käytetty tasoilmaisuus voidaan pitää herätteenä signaalinkäsittelyosalle. Signaalinkäsittelyosa tutkii oliko herätyksen aiheuttanut signaalin voimakkuuden muutos liikkeenilmaisimen läheisyydessä liikkuvan kohteen aiheuttama vai ainoastaan hetkellinen häiriö. Mikäli signaalinkäsittelyosa havaitsee liikkeenilmaisimen signaalin perusteella kohteen, tulkitaan signaalista kohteen ominaisuudet ja lähetetään hälytys sekä kohteen ominaisuudet välittömästi siirtotietä pitkin valvomoon.

6.6 Kohteen nopeuden arviointi

Kohteen nopeus voidaan arvioida karkeasti mitatusta signaalista lasketun FFT-muunnoksen avulla. Tästä tiedosta voi olla hyötyä arvioitaessa pitääkö hälytykseen reagoida vai ei. Nopeasti liikkuvat kohteet saattavat olla matalalla lentäviä lintuja. Hitaasti liikkuvat kohteet saattavat olla pieniä eläimiä. Ihmisen kävelynopeus tietäntyyppisessä maastossa on kohtuullisen vakio. Tätä tietoa voidaan käyttää hyväksi arvioitaessa pitääkö hälytykseen reagoida.

6.7 Kohteen koon arviointi

Liikkeenilmaisimen lähimaastossa liikkuvan kohteen koon arviointi olisi erittäin arvokas tieto virrehälytysten karsimisen kannalta. Tämän työn yhtenä tavoitteena oli selvittää kohteen koon vaikutusta liikkeenilmaisimen Tässä työssä saatujen tulosten perusteella liikkeenilmaisimen lähimaastossa liikkuvan kohteen koosta ei voida päätellä mitään liikkeenilmaisimesta saatavan signaalin perusteella. Tulos on teorian valossa yllättävä, koska kohteen koko ja geometria ovat varsin merkittäviä osia signaalin muodostumisen mekanismia. Kohteen koon vaikutus liikkeenilmaisimen signaaliin saattaa olla sen laatuinen, että se ei tullut tässä työssä tehdyissä kokeissa ja tulosten tarkastelussa esiin. Saadut tulokset eivät myöskään sulje pois mahdollisuutta, että kohteen koosta olisi mahdollista saada tietoa liikkeenilmaisimen signaalista. Kohteen koon vaikutuksen arvioimiseksi olisi tehtävä lisää kokeita.

6.8 Numeerisen mallin rakentaminen liikkeenilmaisimen toiminnasta

Tässä työssä saatujen koetulosten pohjalta pitäisi olla mahdollista arvioida laskennallisten menetelmien käytettävyyttä liikkeenilmaisimen jatkotutkimuksessa. Laskennallisten mallien rakentaminen liikkeenilmaisimen toiminnasta pitäisi perustua olemassa olevien numeeristen menetelmien käyttöön. Jotta numeerisia menetelmiä voitaisiin käyttää, pitäisi tarkasteltavaa aluetta pienentää merkittävästi. Koetuloksia voidaan käyttää hyväksi kokeiltaessa kuinka paljon ongelman dimensiota voidaan pienentää laskennallisten tulosten kuitenkaan kärsimättä liikaa. Mikäli havaitaan, että ongelmaa voidaan redusoida niin paljon, että laskennallinen kapasiteetti on riittävä, voidaan tämän työn ulkopuolelle jätettyjen faktoreiden vaikutusta kokeilla suhteellisen vaivattomasti.

6.9 Ehdotetut jatkotoimenpiteet tärkeysjärjestyksessä

1. Tässä työssä saadut tulokset verifioidaan olemassa olevalla prototyypillä todellisilla kohteilla aidossa liikkeenilmaisimen käyttöympäristössä.
2. Rakennetaan liikkeenilmaisimesta uusi prototyyppi, jossa on tässä työssä esitetyn kaltainen ilmaisutekniikka.
3. Tehdään lisäselvityksiä kohteen nopeuden ja sen liikekorkeuden vaikutuksesta liikkeenilmaisimen signaaliin.
4. Tehdään ylimääräisiä kokeita, joilla arvioidaan kohteen koon vaikutusta liikkeenilmaisimen ulostulosignaaliin.
5. Tutkitaan uudelleen mahdollisuutta mallintaa liikkeenilmaisimen toimintaa laskennallisten menetelmien avulla redusoimalla ongelman laajuutta. Laskennallisten menetelmien antamia tuloksia pienennetyllä mallilla verrataan tässä työssä saatuihin mittaustuloksiin. Tulosten vertailun avulla voidaan todeta onko pienennetyn liikkeenilmaisimen mallin käyttäytyminen likimain samanlaista kuin todellisen prototyypin.

7. Lähdeluettelo

- Arulanandan, K.1991. Dielectric Method for Prediction of Porosity of Saturated Soil. New York. ASCE. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 117. N:o 2. ss. 319-330
- Baum, C.Felsen, L.1976. The Singularity Expansion Method. Berlin, Heidelberg, New York. Springer-Verlag. Topics in Applied Physics. Vol. 10: Transient Electromagnetic Fields.
- Cooley, J.;Tukey, J.1965. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. Providence. American Mathematical Society. Mathematics of Computation. Vol. 19. ss. 297-301
- Côte, B.; Forget, C.; Thérien, N.; Broadbent, A.1991. Measuring the Water Content of a Textile Fabric Using a Radio Frequency Sensor. Textile Research Journal. Vol. 61. N:o 12. ss. 724-728
- Courant, R.1943. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. Bulletin of the American Mathematical Society. Vol. 49. ss. 1-23
- Filho, S.; Portela, C.1988. Investigation of Soil as a Lossy Dielectric. Proceedings of the Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Peking. 12-16.9.1988. New York. IEEE. ss. 515-518
- Higashi, T.; Ishihara, K.1990. Measurement of the Complex Relative Permittivity Frequency Characteristics of the Body Using Pulse-Reflection. New York. Scripta Technica. Electronics and Communications in Japan, Part 3. Vol. 73. N:o 4. ss. 841-849
- Hill, D.1988. Fields of Horizontal Currents Located Above the Earth. New York. IEEE. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 26. N:o 6. ss. 726-732
- Jackson, L.1989. Digital filters and signal processing. Norwell. Kluwer Academic Publishers. 410 s.
- Karimullah, K.; Chen, K.; Nyquist, D.1980. Electromagnetic Coupling Between a Thin-Wire Antenna and a Neighboring Biological Body: Theory and Experiment.

New York. IEEE. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. MTT-28. N:o 11. ss. 1218-1225

Lindell, I.; Nikoskinen, K.1995. Antenniteoria. Helsinki. Otatieto. 347 s.

Livesay, D.;Chen, K.1974. Electromagnetic Fields Induced Inside Arbitrarily Shaped Biological Bodies. New York. IEEE. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. MTT-22. N:o 12. ss. 1273-1280

Milton, J.; Arnold, J.1986. Probability and Statistics in the Engineering and Computing Sciences. Singapore. McGraw-Hill Book Co. 643 s.

Montgomery, D.1991. Design and Analysis of Experiments. New York. John Wiley & Sons. 538 s.

Moore, J.;Pizer, R. (Ed.)1984. Moment Methods in Electromagnetics. Chichester. John Wiley & Sons Inc.. 398 s.

Nyquist, D.; Chen, K.; Guru, B.1977. Coupling Between Small Thin-Wire Antennas and a Biological Body. New York. IEEE. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. AP-25. N:o 6. ss. 863-866

Sadiku, M.1992. Numerical Techniques in Electromagnetics. Boca Raton. CRC Press. 690 s.

Shelswell, P.; Thoday, R.; Wakeling, S.1988. Health and Safety with RF Broadcast Radiation. IBC 1988 - International Broadcasting Convention. Brighton. 23-27.9.1988. Lontoo. IEE. ss. 120-124

Thevanayagam, S.1993. Electrical Response of Two-Phase Soil: Theory and Applications. New York. ASCE. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 119. N:o 8. ss. 1250-1275

Thom, A.; Apelt, C.1961. Field Computations in Engineering and Physics. Lontoo. D. van Nostrand.

Tsuboi, H.; Tanaka, H.; Fujita, M.1989. Electromagnetic Field Analysis of the Wire Antenna in the Presence of a Dielectric With Three-Dimensional Shape. New York. IEEE. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 25. N:o 5. ss. 3602-3604

Welch, D.1967. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified

Periodograms. New York. IEEE. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. Vol. AU-15. N:o 2. ss. 70-73

Yee, K.1966. Numerical solution of initial boundary-value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. Piscataway. IEEE. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. AP-14. N:o 5. ss. 302-307

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
TIETOJENKÄSITTELYOPIN
KÄSIKIRJASTO

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
TIETOJENKÄSITTELYOPIN
KÄSIKIRJASTO

